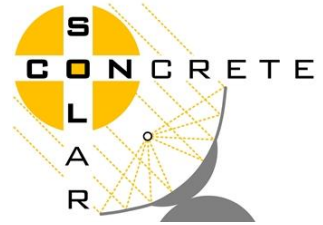


# ConSol

Concrete Solar Collector



## Ergebnisbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011  
Förderkennzeichen: FKZ 0325888 A-G  
Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebetechnik GmbH

Almeo GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr-Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilewerk GmbH

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Juli 2018

## Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	3
2. Gliederung des Ergebnisberichts.....	4
3. Zusammenfassung.....	5

# 1. Einführung

Parabolrinnenkollektoren sind die bisher kommerziell erfolgreichste Technologie für solarthermische Kraftwerke. Für die weitere Verbreitung ist eine Reduzierung der Investitionskosten erforderlich. Das Projekt ConSol soll durch eine gänzlich neue Technologie Ansätze dafür bieten. Kern der Entwicklung sind aus bewehrtem Beton gegossene Kollektorschalen, die auf einem innovativen Abrollhügel der Sonne nachgeführt werden.

Beton als kostengünstiger und weltweit verfügbarer Werkstoff ermöglicht bisher nicht erreichte Modulgrößen, erfordert jedoch angepasste Lösungen für Lagerung und Nachführung, sowie vollständige Fertigung vor Ort. Dabei wurde auf bewährte Lösungen aus der Beton-Fertigteilebranche zurückgegriffen. Die Betonschale wurde mit einem flexiblen Silberspiegel auf Basis eines Aluminiumcoil ausgerüstet (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Betonkollektor bei Fa. Stanecker**

Folgende Autoren haben an Bericht und Projekt mitgewirkt:

Organisation	Vorname	Name	EMAIL
DLR	Dirk	Krüger	<a href="mailto:dirk.krueger@dlr.de">dirk.krueger@dlr.de</a>
	Nicole	Dr. Janotte	<a href="mailto:nicole.janotte@dlr.de">nicole.janotte@dlr.de</a>
	Christoph	Prahl	<a href="mailto:christoph.prahl@dlr.de">christoph.prahl@dlr.de</a>
	Johannes	Wette	<a href="mailto:johannes.wette@dlr.de">johannes.wette@dlr.de</a>
	Martin	Eickhoff	<a href="mailto:Martin.Eickhoff@dlr.de">Martin.Eickhoff@dlr.de</a>
TU Kaiserslautern	Jürgen	Prof. Dr.-Ing. Schnell	<a href="mailto:juergen.schnell@bauing.uni-kl.de">juergen.schnell@bauing.uni-kl.de</a>
	Sebastian	Penkert	<a href="mailto:sebastian.penkert@bauing.uni-kl.de">sebastian.penkert@bauing.uni-kl.de</a>
	Tobias	Stallmann	<a href="mailto:tobias.stallmann@bauing.uni-kl.de">tobias.stallmann@bauing.uni-kl.de</a>
RUB	Peter	Prof. Dr. Mark	<a href="mailto:peter.mark@ruhr-uni-bochum.de">peter.mark@ruhr-uni-bochum.de</a>
	Patrick	Dr. Formann	<a href="mailto:patrick.forman@ruhr-uni-bochum.de">patrick.forman@ruhr-uni-bochum.de</a>
	Rolf	Prof. Dr. Breitenbücher	<a href="mailto:Rolf.Breitenbuecher@rub.de">Rolf.Breitenbuecher@rub.de</a>
	Robin	Przondziono	<a href="mailto:Robin.Przondziono@rub.de">Robin.Przondziono@rub.de</a>
Solarlite	Joachim	Dr. Krüger	<a href="mailto:Joachim.Krueger@solarlite.de">Joachim.Krueger@solarlite.de</a>
	Timo	Zippler	<a href="mailto:timo.zippler@solarlite.de">timo.zippler@solarlite.de</a>
	Yuvaraj	Pandian	<a href="mailto:Yuvaraj.pandian@solarlite.de">Yuvaraj.pandian@solarlite.de</a>
Almeco	Reinhard	Dr. Dasbach	<a href="mailto:reinhard.dasbach@almecogroup.com">reinhard.dasbach@almecogroup.com</a>
Stanecker	Tobias	Stanecker	<a href="mailto:t.stanecker@stanecker.de">t.stanecker@stanecker.de</a>
Pfeifer	Matthias	Kintscher	<a href="mailto:mkintscher@pfeifer.de">mkintscher@pfeifer.de</a>
	Alois	Natterer	<a href="mailto:anatterer@pfeifer.de">anatterer@pfeifer.de</a>

## 2. Gliederung des Ergebnisberichts

Der Ergebnisbericht besteht aus einer Sammlung der Arbeitspaketberichte. Jeder Arbeitspaketbericht ist ein eigenständiges Dokument mit Inhaltsverzeichnis und einer Zusammenfassung. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete bereits zusammengefasst. Alle Ergebnisse werden in den Arbeitspaketen dargestellt, die Nummerierungsweise ist Umstellungen in der Antragsphase geschuldet.

Der Gesamtbericht gliedert sich in folgende Arbeitspakete (AP):

Arbeitspaket	Inhalt
AP 1.1.1	Betontechnik
AP 1.1.2	Klebertechnik
AP 1.2	Konstruktion Konzentratorstruktur
AP 1.3	Entwicklung Spiegelmaterial



AP 1.4	Qualitätssicherung
AP 2	Unterbauten, Lagerung, Antrieb und Rohrleitungssystem
AP 3	Fertigungs- und Montagekonzept
AP 4	Bau und Vermessung Demo-Modul
AP 5	Kostenanalyse und Zukunftskonzepte

### 3. Zusammenfassung

Im ConSol Projekt wurden verschiedene an eine Betonkollektorstruktur angepasste Techniken entwickelt und umgesetzt.

Es gelang eine Schale mit 3,5 bis 5,5cm Dicke bei einer Aperturweite von 5,77m und 12m Länge zu entwickeln, die auch im Prototypen eingesetzt wurde. Diese wird auf einem Abrollhügel der Sonne nachgeführt, wobei der Schwerpunkt ständig über dem Auflagepunkt liegt.

Eine lineare Nachführung treibt jeweils 2 Kollektormodule an. Die Motoren werden über ein Rohr miteinander verbunden, so dass bei Ausfall eines Motors dennoch alle Module gleich nachgeführt werden.

Die solar gewichtete, gerichtete Reflektivität von Aluminiumcoil mit Silberspiegeln konnte auf 92,3% erhöht werden.

Auf Basis der Entwicklungen wurden die Kosten für ein Solarfeld von 510.000m<sup>2</sup> Kollektorfläche ermittelt. Dabei wurden reduzierte Kosten für hohe Stückzahlen einbezogen und die Kosten für die Produktionsmittel detailliert berechnet. Der spezifische Quadratmeterpreis liegt bei 261€/m<sup>2</sup> im Vergleich zu 242 €/m<sup>2</sup> bei den Andasol Kraftwerken für fertig installierte Solarfelder unter Einbeziehung von Kollektoren, Feldverrohrung, Elektrotechnik, Steuerung etc..

Untersuchungen zu schlankeren Betonstrukturen haben gezeigt, dass eine Gewichtsreduktion von Kollektorschale und Abrollhügel um ca. 50% möglich ist. Damit verringern sich die Materialkosten für diese Bauteile von 76 €/m<sup>2</sup> auf 38 €/m<sup>2</sup> und der spez. Kollektorfeldpreis auf 223 €/m<sup>2</sup>.

Die zu erwartenden Jahreserträge eines Kollektors wurden basierend auf den Ergebnissen aus der Fotogrammetrie der beiden gebauten Kollektormodule ermittelt. Die Berechnungen zeigen, dass die LEC (Levelised Costs of Electricity) für ein Kraftwerk mit Andasol Layout mit den Investitionen und dem Wirkungsgrad des ConSol Kollektors bei etwa 21,93 €-ct/kWh liegen. Im Vergleich dazu liegen die LEC des Andasol Referenzkraftwerks bei 19,0 €-ct/kWh.

Das Projekt konnte erfolgreich mit dem Bau eines Prototypen abgeschlossen werden, mit dem die Funktionalität des Konzeptes gezeigt wurde. Eine fotogrammetrische Messung hat gezeigt, dass sich die Schale nach dem Guss (wie erwartet) aufgeweitet hat, so dass durch die Abweichung der Kollektorsteigung der Interceptwert bei 86% liegt, unter Berücksichtigung einer Verschiebung nach oben des Receivers. Mögliche Ursachen hierfür können sowohl in der Abformung beim Guss, in Kriech-, Setz- und Schrumpfprozessen beim Aushärten des Betons als auch in der Verformung durch Eigengewicht aufgrund mangelnder Steifigkeit liegen. Zumindestens in Teilen kann die Formabweichung durch eine entsprechende Kompensation in der Gussform aufgefangen werden.

Hier ein Überblick über die Kapitelinhalte und Ergebnisse:

#### AP 1.1.1 Betontechnik

In diesem Arbeitspaket wurden die Eigenschaften von ausgewählten Materialien, Einwirkungen auf die Kollektorkonstruktion und Designoptionen untersucht und grundlegende Arbeiten durchgeführt. Bei der Modellierung und Verformungsanalyse der Betonkollektormodule hat sich gezeigt, dass eine Aneinanderreihung der Module mit zentralem Antrieb, wie bei existierenden Stahlkonstruktionen üblich, nicht möglich ist, die bei hohen Windlasten auftretenden Torsionskräfte können durch die Konstruktion nicht aufgenommen werden. Deswegen wurde eine Konstruktion entworfen, bei der ein Antrieb zwei Module antreibt. Die Auslegung wurde mittels einer Genauigkeitsanalyse überprüft.

Ein dauerhafter direkter Verbund zwischen den Aluminiumspiegeln und dem Beton wurde untersucht. Der frische Beton wurde direkt auf die Spiegelnrückseite betoniert, aber es konnte kein ausreichender Verbund hergestellt werden.

Bei Untersuchungen des Chloridmigrationskoeffizienten hat sich herausgestellt, dass für den Schutz der Stahlbewehrung gegen Korrosion nur eine vergleichsweise dünne Betondeckung nötig ist.

#### AP 1.1.2 Klebetechnik

Die Arbeiten dieses Arbeitspaketes sollten vorwiegend durch die Firma Sika wahrgenommen werden, die jedoch bereits vor dem Projektbeginn aus dem Konsortium ausgeschieden ist. Einige Themen wurden aber dennoch von den Partnern bearbeitet mit Unterstützung durch die Firma Tesa.

Als Auswahlkriterium für die Verklebung des Spiegels wurden u.a. die Kräfte, die auf den Klebstoff einwirken bestimmt, sowie die wirtschaftlichen Anforderungen.

Mechanische und thermische Tests der Verbindung wurden im Rahmen der AP 1.1.1 und AP 1.3 untersucht. Es wurde ein Klebeband gefunden mit dem das Spiegelblech dauerhaft am Betonkollektor befestigt werden kann.

### AP 1.2 Konstruktion Konzentratorstruktur

Es wurden Angaben für das Lastenheft zu Einwirkungen von Kräften auf die Kollektorstruktur erarbeitet, die Eingang in die FEM Analyse zur Kollektorverformung fanden.

In Modellrechnungen hat sich gezeigt, dass eine Auslegung als einwandige Schale bei Kollektorreihen mit je 2x5 Modulen je Antrieb zu große Verformungen infolge der aufsummierten Torsionsbeanspruchungen aufweist. Daher wurde ein Modell entwickelt, welches aus 2 Modulen je Antrieb besteht, was ein dezentrales Antriebssystem für die Kollektoren erfordert und es wurden in einem iterativen Prozess an Genauigkeitsanforderungen des EuroTrough angepasst.

Als wesentliche Innovation wurde im ConSol Projekt das Konzept des „Abrollhügels“ eingesetzt. Der Abrollmechanismus mit Abrollsichel und Verzahnung wurde konstruiert und in Tests geprüft.

### AP 1.3 Entwicklung Spiegelmaterial

In Kombination mit der Betonkollektorschale ist der Einsatz eines flexiblen Spiegels sinnvoll. Im Projekt wurden Spiegel auf Basis eines Aluminiumcoils untersucht. Zunächst wurden dafür die Anforderungen bestimmt. Für konzentrierende Solarsysteme sind eine hohe gerichtete Reflektivität des solaren Spektrums, Formgenauigkeit, lange Haltbarkeit und geringe Kosten wichtig.

Es wurden auf Basis erster Optimierungsschritte mit einem optischen Simulationsprogramm verschiedene Schichtsysteme auf Aluminiumsubstrat entwickelt und mit Degradationstests eine Vorprüfung und Bewertung der Schichtsysteme vorgenommen. Insbesondere mit neuen Sol-Gel Schichtsystemen konnten gute Ergebnisse erzielt werden.

Aussichtsreiche Schichtsysteme wurden ausführlichen Degradations- und Abrasionstests unterzogen. Die Ergebnisse sind dann in die Entwicklung weiterer Schichtsysteme eingeflossen. Im AP 1.4 sind die erreichten Parameter für Reflexion und Degradation dargestellt.

Es wurden Versuche auf einer industriellen Bandlaminierungsanlage durchgeführt bei denen das Klebeband auf die Rückseite von 1200mm breitem und 0,4mm dickem Aluminiumspiegelmaterial auflaminiert wurde. Das Klebeband konnte plan aufgebracht werden und weist eine gute Haftung auf dem Aluminiummaterial auf. Dieses Spiegelmaterial wurde auf die Parabolrinne des Demonstrators aufgebracht.

#### AP 1.4 Qualitätssicherung

Die im Laufe des Projektes hergestellten Reflektorvarianten mit unterschiedlichen Schichtsystemen auf einem Aluminiumsubstrat wurden in beschleunigten Alterungstests geprüft und ihre Reflektivität vor sowie nach den Tests vermessen.

Im Vergleich zu aluminiumbasierten Proben, die bei Almeco zu Beginn des Projektes zur Verfügung standen wurde die solar gewichtete, gerichtete Reflektivität von 82,6% auf 92,3% erhöht, also fast um 10%-Punkte.

Aussichtsreiche Materialien wurden hinsichtlich ihrer Beständigkeit untersucht. Zwar gibt es noch Aufholbedarf im Vergleich zu Glas-Silberspiegeln, aber es wurden deutliche Fortschritte erzielt bei Alterungstests, die Wüsten- und Küstenstandorte simulieren, im Vergleich zum Stand zu Projektbeginn.

Für die Befestigung des Spiegels am Beton wurde ein doppelseitiges Klebeband der Firma TESA ausgewählt. Das Substrat des Klebebandes ist ein PE-Schaum der auf beiden Seiten mit einem modifizierten Akrylatkleber beschichtet ist. Sowohl auf dem Beton als auch auf den unterschiedlich beschaffenen Aluminiumoberflächen wies das Material eine sehr gute Haftung auf. Um die Verklebung zu testen, wurde das Material auf dem Demonstrator aufgebracht und auch nach längerem Außeneinsatz und zyklischen Feuchte- und Temperaturtests wurden keine Probleme der Verbindung festgestellt. Alle Tests verliefen positiv, das Reflektormaterial hat sich nicht gelöst.

#### AP 2 Unterbauten, Lagerung, Antrieb und Rohrleitungssystem

Im Rahmen des AP2 wurden alle weiteren Bauteile außer der Betonschale und der Spiegel entworfen und ausgelegt. Hierzu gehören die Betonteile (Abrollhügel, Zahnräder und Köcherfundamente), eine angepasste flexible Rohrverbindung für die Abrollgeometrie, alle weiteren Einbauteile für die Betonstruktur und das Antriebssystem mit einer algorithmisch gesteuerten Nachführung.

Angepasst an die Nachführung über einen Abrollhügel wurde ein Nachführmechanismus entwickelt. Es wurden als Vorauswahl verschiedene Antriebsarten betrachtet: hydraulisch, Linearantrieb elektrisch, Zahnkranz elektrisch, Schneckenantrieb elektrisch, Zahnkranz, Drahtseil, Rollenkette und Friktionsrad. Es wurden drei Antriebsarten als mögliche Varianten näher untersucht.

Weiterhin wurden mögliche Wartungskonzepte für ein großes Solarfeld entwickelt.

#### AP 3 Fertigungs- und Montagekonzept

Der Aufbau und die damit verbundenen Kosten für die Fertigung in einer Feldfabrik, der Verspiegelung der Kollektoren und der Feldinstallation wurden detailliert für ein Kollektorfeld mit der Größe des Andasol Kraftwerks (510.000<sup>2</sup>) nach Investitionen,

Personal- und Materialkosten aufgeschlüsselt. Mit den Kosten der untersuchten Komponenten aus AP2 wurde ein spezifischer Quadratmeterpreis von 205,1 €/m<sup>2</sup> ermittelt.

Eine Schalform wurde entsprechend den vorgegebenen Maßen gefertigt. Darin wurden erfolgreich zwei Kollektorschalen für den Prototypen gegossen.

#### AP 4 Bau und Vermessung Demomodul

In Rahmen des AP 4 wurde ein Prototyp bestehend aus zwei Kollektormodulen und einem Antrieb bei der Firma Stanecker errichtet (Abbildung 1).

Dazu wurde die Statik für dieses Bauwerk prüffähig aufgestellt und durch einen unabhängigen Statiker geprüft.

Der Prototyp wurde vermessen und der Betrieb mit Nachführung mit einem einfachen Wasserkühlkreislauf getestet.

Mittels einer Fotogrammetrie wurde ein Interceptwert von lediglich 46% für die Zenitposition ermittelt, der insbesondere durch eine (erwartete) Aufweitung des Kollektormoduls zustande kommt. Dies kann durch eine Verschiebung des Receivers teilweise kompensiert werden, dann beträgt der Interceptwert 86%.

#### AP 5 Kostenanalyse und Zukunftskonzepte

Ein Schwerpunkt dieses AP behandelt die Optimierung der Kollektorstruktur zur Verringerung des Beton- und Bewehrungsanteils. Verschiedene Konzepte werden vorgestellt und ihre Auswirkungen diskutiert auf Basis numerischer Untersuchungen. Eine Materialreduktion von ca. 50% ist möglich über schlankere Strukturen bei gleichzeitig erhöhter Formstabilität.

Die Degradation der im Projekt entwickelten Spiegel wurde untersucht für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken.

Insbesondere für den Betrieb des Prototypen wurde eine Bedienungsanleitung und eine umfassende technische Dokumentation des Antriebs erstellt.

Schließlich werden die zu erwartenden Jahreserträge eines Kollektors basierend auf den Ergebnissen aus der Fotogrammetrie der beiden gebauten Kollektormodule ermittelt. Die Berechnungen zeigen, dass die LEC für ein Kraftwerk mit Andasol Layout mit den Investitionen und dem Wirkungsgrad des ConSol Kollektors bei etwa 21,93 €/ct/kWh liegen. Im Vergleich dazu liegen die LEC des Andasol Referenzkraftwerks bei 19,0 €/ct/kWh.

# ConSol

## Concrete Solar Collector

### Bericht AP 1.1.1

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebetechnik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr-Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH

# Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Definition der Basiskriterien .....	4
4. Simulationsbasierte Untersuchungen zum Verbundverhalten.....	5
4.1 Wärmespannungen im Werkstoffverbund.....	5
5. Designstudien .....	7
5.1 Geometrische Randbedingungen.....	7
5.2 Materialdaten .....	8
5.3 Einwirkungen.....	10
5.4 Genauigkeitsanforderungen .....	11
5.5 Dimensionierungskonzept .....	12
6. Formfindung.....	12
6.1 Designstudien .....	12
6.2 Entwurf und Bemessung .....	13
6.3 Finales Design des Demonstrators.....	19
7. Statische Berechnung und Ausarbeitung wesentlicher Detaillösungen für die Konstruktion in AP 1.2.....	22
7.1 Querkraft und Durchstanzen .....	22
7.2 Anschlüsse.....	24
8. Betonversuche zur Ermittlung der Auswirkung verschiedener Schalöle auf die Klebwirkung.....	28
8.1 Ausgangsstoffe und Kennwerte des Betons .....	28
8.2 Verbund zwischen Spiegel und Beton .....	30
9. Betonversuch zur Bestimmung der Klebwirkung bei direkter Betonage auf die Spiegelrückseite .....	34
10. Versuchsreihe zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit der Oberfläche gegen Sandstrahlen .....	35
11. Betonversuch zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten .....	37
12. Aufstellung einer projektspezifischen Lebensdauerprognose anhand ermittelter Kennwerte .....	38



# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	01.02.2016	Patrick Forman	Verbundverhalten
2	03.05.2016	Patrick Forman	Designstudien/Torsion
3	09.06.2016	Patrick Forman	Entwurf
4	07.10.2016	Patrick Forman	Bemessung
5	05.03.2018	Patrick Forman	Ergänzungen zu Entwurf und Bemessung
6	11.06.2018	Timo Zippler	Abschnitt 3
7	10.07.2018	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung
8	10.07.2018	Patrick Forman	Überarbeitung Abschnitt 5,6,7
9	12.07.2018	Robin Przondziono	Abschnitt 8,9,10,11,12

**Tabelle 1-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 1.1.1.

In diesem Arbeitspaket wurden die Eigenschaften von ausgewählten Materialien, Einwirkungen auf die Kollektorkonstruktion und Designoptionen untersucht und grundlegende Arbeiten durchgeführt. Bei der Modellierung und Verformungsanalyse der Betonkollektormodule hat sich gezeigt, dass eine Aneinanderreihung der Module mit zentralem Antrieb, wie bei existierenden Stahlkonstruktionen üblich, nicht möglich ist, die bei hohen Windlasten auftretenden Torsionskräfte können durch die Konstruktion nicht aufgenommen werden. Deswegen wurde eine Konstruktion entworfen, bei der ein Antrieb zwei Module antreibt. Die Auslegung wurde mittels einer Genauigkeitsanalyse überprüft.

Ein dauerhafter direkter Verbund zwischen den Aluminiumspiegeln und dem Beton wurde untersucht. Der frische Beton wurde direkt auf die Spiegelnrückseite betoniert, aber es konnte kein ausreichender Verbund hergestellt werden.

Bei Untersuchungen des Chloridmigrationskoeffizienten hat sich herausgestellt, dass für den Schutz der Stahlbewehrung gegen Korrosion nur eine vergleichsweise dünne Betondeckung nötig ist.

Ziel ist es, das für die Herstellung des Demo-Moduls geeignete Konzept zu identifizieren und als Basis für die Herstellung im AP 1.2 unter den maßgebenden Einwirkungen zu bemessen.

### 3. Definition der Basiskriterien

Die im Folgenden beschriebenen Basiskriterien sind eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung eines Parabolrinnenkollektors aus Beton.

Art der Nutzung	Außenanwendung
Standorttypen	Wüsten, tropische Regionen, Küstenregionen (salzhaltige Luft), stark belastete Luft in Industrieanlagen
Arbeits- / Betriebstemperatur	- 40 °C / + 70 °C
Lager- / Transporttemperatur	- 40 °C / + 70 °C
Luftfeuchte	0 - 100 % relative Feuchte
Materialeigenschaft	UV-beständig, wasserdicht, standhaft gegen salzhaltiger Luft, Eignung zur Applizierung eines Klebstoffs
Parabelform	Angelehnt an das EuroTrough-Design Aperturweite (d): 5.770 mm Fokallänge (f): 1.710 mm RIM-Winkel: 80,3° f/d Verhältnis: 0,296 Kurvenhöhe (h): 1.216,85 mm Radius Parabel (p): 2.927 mm Bogenlänge (s): 6.395,2 mm
Gewicht	Die Trägerstruktur (Schale) sollte ein möglichst geringes Gewicht aufweisen in Bezug auf die benötigte Unterkonstruktion, Fundamente, Hebemittel und Transportvorrichtungen
Formgenauigkeit	Abweichung von der idealen Parabel < 3-5mm
Betonoberfläche auf der Spiegel-seite	Die Oberfläche sollte keine Unebenheiten oder andere Fehler aufweisen (z.B. Wellen, Lunker). Weiterhin sollte die Oberfläche geeignet sein, um die Reflektoren (Spiegel) darauf zu befestigen ohne weitere Bearbeitung nach der Produktion.
Steifigkeit	Die Steifigkeit der Trägerstruktur muss ausreichend gegeben sein, um auftretende Windkräfte und Eigenlasten zu kompensieren. Windlasten: Betrieb: 10 m/s Überlebensfall: bis 33m/s
Lebensdauer	25 Jahre
Fertigungstechniken	Die Fertigungstechniken müssen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der vorgegebenen Fertigungstoleranzen gewährleisten
Montage	Der Aufbau der Schale mit den benötigten Einbau- und Anbauteilen sollte so konstruiert werden, dass ein möglichst einfache und schnelle Montage erzielt werden kann

## 4. Simulationsbasierte Untersuchungen zum Verbundverhalten

### 4.1 Wärmespannungen im Werkstoffverbund

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften von Aluminium und Beton kommt es bei einer Erwärmung des Verbundbauteils um eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  unter Ansatz der Verformungskompatibilität zu Druckspannungen im Beton und Zugspannungsspitzen in der Aluminiumschicht (für  $\Delta T > 0$ ).

Vorerst werden die Spannungen vereinfachend für einen symmetrischen Werkstoffverbund mit beidseitiger Aluminiumdeckschicht hergeleitet, um Biegebeanspruchungen auszuschließen. Der wesentliche Aufbau und die Materialkennwerte sind Abbildung 1.1.1.4.1 dargestellt.

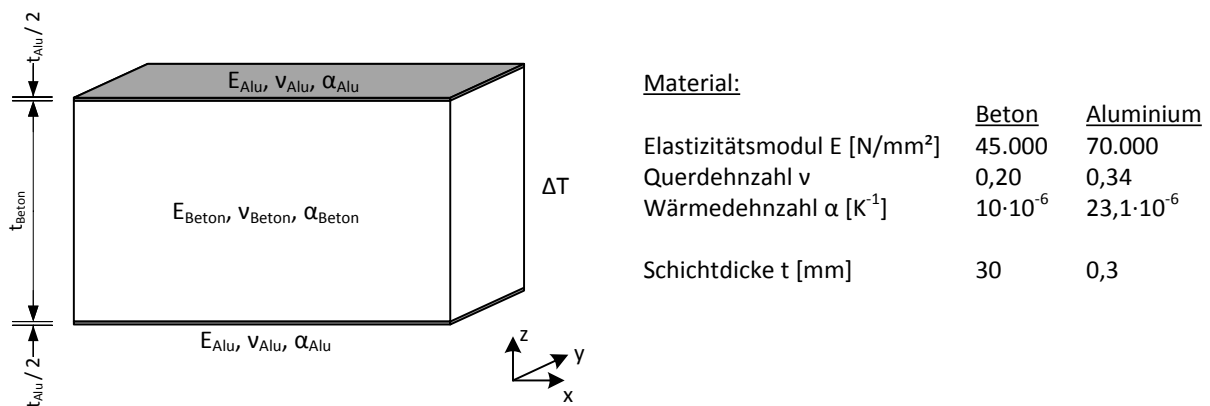


Abbildung 1.1.1.4.1: Aufbau des Verbundbauteils

Es müssen folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Es liegt kein Temperaturgradient im Bauteil vor,
- es tritt keine Biegung auf,
- die Gesamtverformungen der Bauteile sind identisch (Verformungskompatibilität):

$$\varepsilon_{x,\text{Beton}} = \varepsilon_{x,\text{Alu}} \text{ und } \varepsilon_{y,\text{Beton}} = \varepsilon_{y,\text{Alu}}$$

$$\text{mit: } \varepsilon_{\text{Beton}} = \alpha_{\text{Beton}} \Delta T + (1 - \nu_{\text{Beton}}) \frac{\sigma_{\text{Beton}}}{E_{\text{Beton}}}$$

$$\varepsilon_{\text{Alu}} = \alpha_{\text{Alu}} \Delta T + (1 - \nu_{\text{Alu}}) \frac{\sigma_{\text{Alu}}}{E_{\text{Alu}}}$$

- es herrscht Kräftegleichgewicht  $\sum N = 0$  (in x- und y-Richtung):

$$\sigma_{\text{Beton}} t_{\text{Beton}} + \sigma_{\text{Alu}} t_{\text{Alu}} = 0$$

Daraus lassen sich die Normalspannungen in den jeweiligen Bauteilschichten ermitteln:

$$\sigma_{\text{Alu}} = \frac{E_{\text{Beton}} \Delta T (\alpha_{\text{Beton}} - \alpha_{\text{Alu}})}{(1 - \nu_{\text{Alu}}) \frac{E_{\text{Beton}}}{E_{\text{Alu}}} + (1 - \nu_{\text{Beton}}) \frac{t_{\text{Alu}}}{t_{\text{Beton}}}}$$

$$\sigma_{\text{Beton}} = \frac{E_{\text{Alu}} \Delta T (\alpha_{\text{Alu}} - \alpha_{\text{Beton}})}{(1 - \nu_{\text{Beton}}) \frac{E_{\text{Alu}}}{E_{\text{Beton}}} + (1 - \nu_{\text{Alu}}) \frac{t_{\text{Beton}}}{t_{\text{Alu}}}}$$

Für dünne Beschichtungen ( $t_{\text{Beton}} \gg t_{\text{Alu}}$ ) gilt näherungsweise:

$$\sigma_{\text{Alu}} = \frac{E_{\text{Alu}} \Delta T (\alpha_{\text{Beton}} - \alpha_{\text{Alu}})}{1 - \nu_{\text{Alu}}}$$

$$\sigma_{\text{Beton}} \approx 0$$

Beim Ansatz der Materialkennwerte nach Abbildung 1.3.1 und einer Temperaturbeanspruchung von  $\Delta T = 10 \text{ K}$  folgt:

$$\sigma_{\text{Alu}} = -13,64 \text{ N/mm}^2 \quad (-13,90 \text{ N/mm}^2)$$

$$\sigma_{\text{Beton}} = 0,136 \text{ N/mm}^2 \quad (0 \text{ N/mm}^2)$$

Die Ergebnisse sind am numerischen Modell verifiziert worden (Abbildung 1.1.1.4.2).

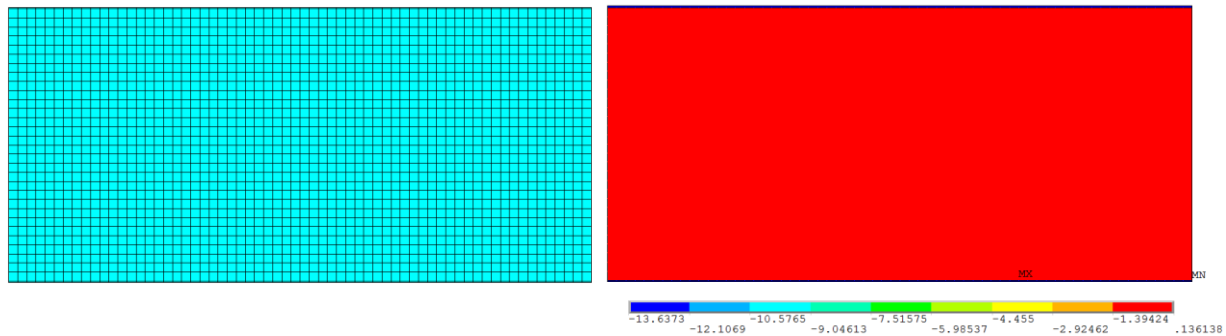


Abbildung 1.1.1.4.2: Finite-Element Modell (links) mit Spannungsverteilung für eine thermische Belastung von  $\Delta T = 10 \text{ K}$

Für einen Werkstoffverbund mit einseitiger Beschichtung, wie es für den Betonkollektor der Fall ist, erfährt das Bauteil eine Biegebeanspruchung bei Temperaturdifferenzen und somit hat die zweite Randbedingung keine Gültigkeit mehr. Eine Ermittlung der Spannungen erfolgt daher lediglich auf numerischer Ebene. Der Aufbau sowie die Spannungen sind in Abbildung 1.1.1.4.3 dargestellt.

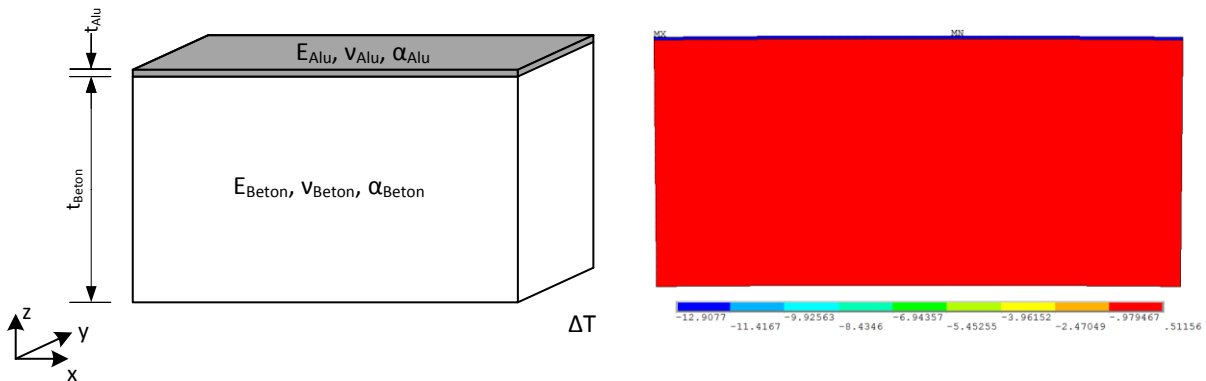


Abbildung 1.1.14.3: Aufbau des Bauteils und resultierende Spannungsverteilung für eine thermische Belastung von  $\Delta T = 10 \text{ K}$

Hieraus resultiert eine Spannungsspitze in der Aluminiumschicht von  $\sigma_{\text{Alu}} = -12,91 \text{ N/mm}^2$ .<sup>1</sup>

Für die Verklebung muss die maximale Zugscherfestigkeit  $\tau_{\text{max}}$  des Klebers eingehalten werden:

$$\tau_{\text{max}} > \tau = \frac{F}{A}$$

mit:  $F = \sigma_{\text{Alu}} t_{\text{Alu}}$  - Zug-Scherkraft

<sup>1</sup> Dies entspricht ansatzweise der Spannung in der Aluminiumschicht für eine beidseitige Beschichtung, da durch die viel geringere Aluminiumschichtdicke ( $t_{\text{Alu}} \ll t_{\text{Beton}}$ ) kaum Biegung erzeugt wird.

In Tabelle 1.1.1.4.1 sind für unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen die resultierenden Spannungen der Aluminiumschicht sowie die Scherspannungen der Fuge für eine Verbundlänge von 10 cm je lfdm angegeben.

*Tabelle 1.1.1.4.1: Gegenüberstellung der Fugenbeanspruchung in Abhängigkeit der therm. Einwirkung  $\Delta T$*

$\Delta T$ [K]	10	20	30	40	50
$\sigma_{Alu}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-12,91	-25,82	-38,73	-51,64	-64,55
$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,038	0,078	0,116	0,155	0,194

## 5. Designstudien

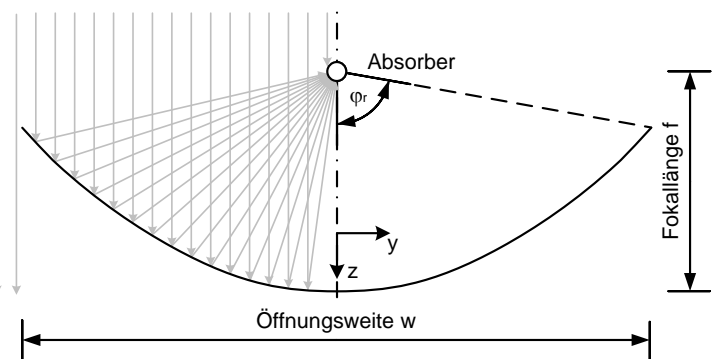
### 5.1 Geometrische Randbedingungen

Die Parabolschale soll an die geometrische Randbedingungen des EuroTrough Kollektors mit einer Apertur von 5,77 m x 12,00 m je Modul angepasst werden sowie die Auflagerkonstruktion des Demonstrators als abrollende Rinne übernehmen. Die geometrischen Daten sind in Tabelle 1.1.1.5.1 und Abbildung 1.1.1.5.2 dargestellt.

Wesentliche Entwicklungen zur Formfindung erfolgten am Einzelmodul mit symmetrischer Lagerung als hochskalierte Variante des kleinformatigen Demonstrator der TU Kaiserslautern

*Tabelle 1.1.1.5.1: Geometrie des geplanten Kollektormoduls, Bezeichnungen nach Abb. 1.1.1.5.1*

Modullänge l	12,00 m
Öffnungsweite w	5,77 m
Fokallänge f	1,71 m
Höhe h	1,22 m
Öffnungswinkel $\varphi_r$	80°
Absorberrohrdurchmesser d	70 mm
Konzentrationsgrad $C=w/d$	82



*Abbildung 1.1.1.5.1: Geometrischer Zusammenhang einer Parabelrinne im Querschnitt*

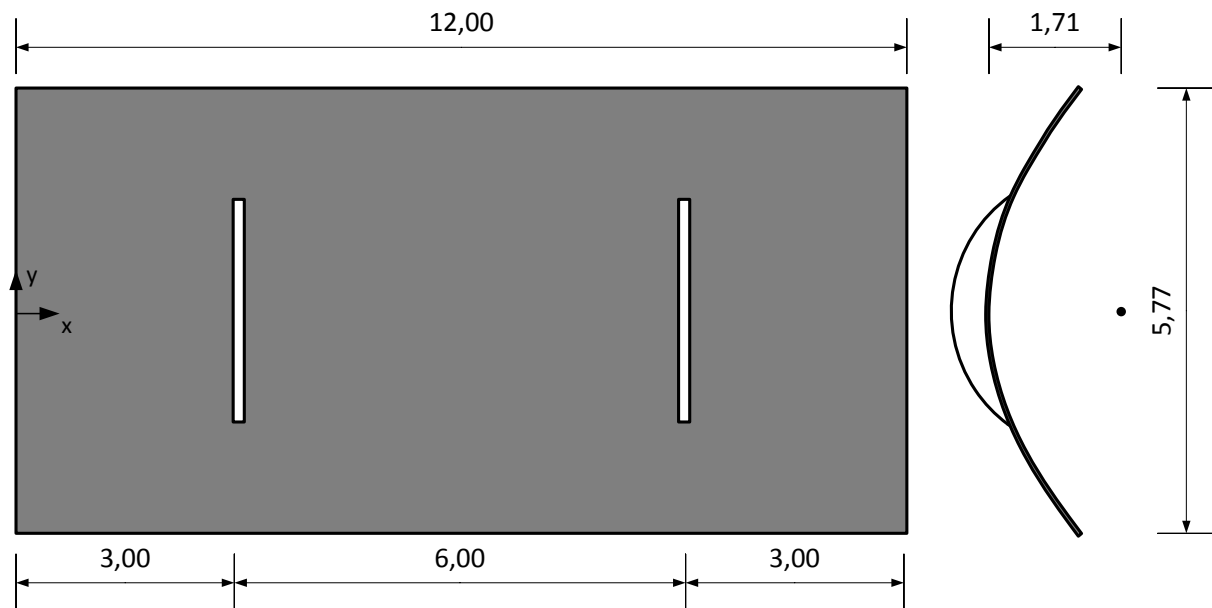


Abbildung 1.1.1.5.2: Geometrie der Parabolschale in Draufsicht

Der Radius der Abrollsegmente des Initialdesigns entspricht der Fokallänge mit 1,71 m. Die Breite der Lagerung wurde in Anlehnung an den Demonstrator mit einem Kreissegmentswinkel von  $\alpha = 110^\circ$  zu 2,80 m bestimmt. Die Schalendicke und weitere Verstärkungen werden im späteren Optimierungsprozess dimensioniert. Das Tragwerk wurde im FE-Programm ANSYS als parametrisierte Model umgesetzt (Abbildung 1.1.1.5.3).

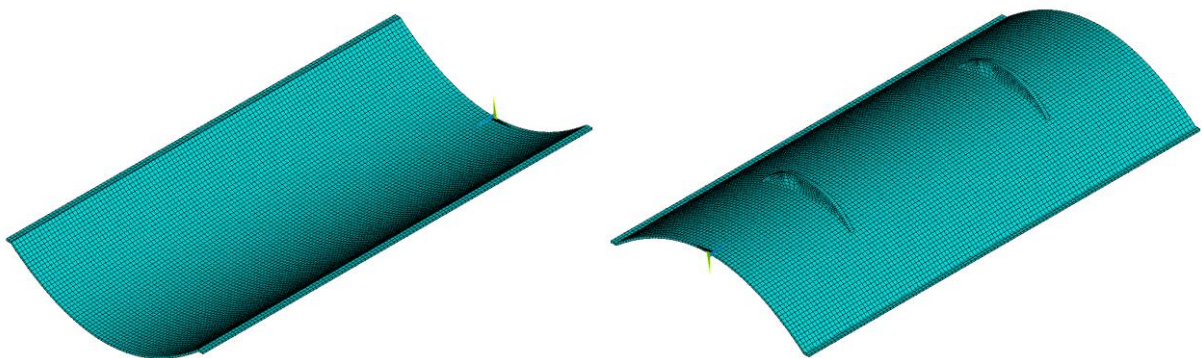


Abbildung 1.1.1.5.3: FE-Modell des Initialdesigns

## 5.2 Materialdaten

Der verwendete Beton basiert auf dem von der Fa. Stanecker abgewandelte Standard-Nanodurrezeptur (vgl. AP 3). Wesentliche Materialdaten des Betons sind

- Druckfestigkeit  $f_{cm} = 139,4 \text{ N/mm}^2$  (Streuung  $\sigma = 4,2 \text{ N/mm}^2$ )
- Biegezugfestigkeit  $f_{ctm,fl} = 18,16 \text{ N/mm}^2$  (Streuung  $\sigma = 1,35 \text{ N/mm}^2$ )
- Rohdichte  $\rho_c = 2436,5 \text{ kg/m}^3$
- Elastizitätsmodul  $E_{cm} = 52.687 \text{ N/mm}^2$

Da die Parabolschale rechnerisch im ungerissenen Zustand I verbleiben soll, muss die erste Hauptnormalspannung auf die zentrische Zugfestigkeit begrenzt werden. Diese lässt sich nach dem Sachstandsbericht UHPC aus der Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Probekörperhöhe ermitteln:

$$f_{ct} = f_{ct,fl} \cdot \frac{2\left(\frac{h}{100}\right)^{0,7}}{1+2\left(\frac{h}{100}\right)^{0,7}}$$

Die untersuchten Probekörper haben Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 160 mm. Daraus resultiert eine zentrische Zugfestigkeit von  $f_{ctm} = 9,34 \text{ N/mm}^2$ .

Für eine Dimensionierung des Schalentragwerks muss der Bemessungswert der zentrischen Zugfestigkeit  $f_{ctd}$  eingehalten werden. Dieser bestimmt sich zu:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ct,0.05\%}}{\gamma_c}$$

mit:  $f_{ct,0.05\%}$  - 5%-Fraktile der Zugfestigkeit

$\gamma_c$  - Teilsicherheitsfaktor

Für die charakteristische Zugfestigkeit (5%-Fraktile) wird der Fraktilwert der Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Mittelwert, zugehöriger Standardabweichung und Stichprobenanzahl  $n$  bestimmt (Tabelle 1.1.1.5.2):

$$f_{ct,fl,0.05\%} = 18,16 - 1,95 \cdot 1,35 = 15,52 \text{ N/mm}^2$$

Dies resultiert in eine zentrische Zugfestigkeit von

$$f_{ctk} = f_{ct,0.05\%} = 7,96 \text{ N/mm}^2.$$

Mit einem Teilsicherheitsbeiwert für Beton von  $\gamma_c = 1,5$  folgt für den Bemessungswert der zentrischen Zugfestigkeit:

$$f_{ctd} = 5,31 \text{ N/mm}^2$$

Tabelle 1.1.1.5.2: Werte  $k_n$  für charakteristische Werte (5%-Fraktile) [DIN EN 1990:2010]

$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_X$ bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_X$ unbekannt	–	–	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

ANMERKUNG 1 Diese Tabelle beruht auf der Normalverteilung.

ANMERKUNG 2 Bei Anwendung der lognormalen Verteilung wird Ausdruck (D.1):

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp \left[ m_y - k_n s_y \right]$$

wobei:

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i)$$

Falls  $V_X$  aus Vorinformationen bekannt ist,

$$s_y = \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)} \approx V_X$$

Falls  $V_X$  nicht aus Vorinformationen bekannt ist,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - m_y)^2}$$



## 5.3 Einwirkungen

### 5.3.1 Eigengewicht

Das Eigengewicht wird über die mittlere Rohdichte (mit einem überschlägigen Betonstahlgehalt) von  $2.500 \text{ kg/m}^3$  berücksichtigt.

### 5.3.2 Windlasten

Windlasten hängen von der Umströmung des Bauteils ab und sind somit einerseits abhängig von der Kollektorneigung sowie der Wechselwirkung mit Nachbarbebauung. Zur Berücksichtigung der Lastverteilung über die Öffnungsweite werden Druckbeiwerte herangezogen, welche an der Ruhr-Universität Bochum in Windkanalversuchen ermittelt wurden (Abbildung 1.1.1.5.4). Diese gelten für die vertikale Mittelachse und werden über die Länge der Module als konstant angenommen. Aufgrund der beschränkten Verdrehbarkeit infolge der Abrolllagerung werden die drei folgenden Auslenkungen berücksichtigt.

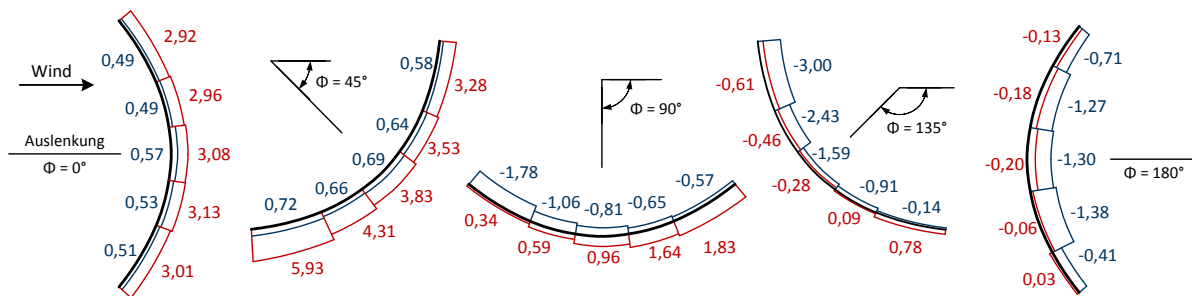


Abbildung 1.1.1.5.4: Verteilung der Lastbeiwerte  $c_{p,net}$  über die Öffnungsweite<sup>2</sup>

Die Windlasten  $w$  [ $\text{N/m}^2$ ] auf die Parabolschale lassen sich nun in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit bestimmen.

$$w = c_{p,net} \cdot q_{ref} = c_{p,net} \cdot \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$$

mit:  $\rho$  – Dichte der Luft ( $=1,25 \text{ kg/m}^3$ )

$q_{ref}$  – Referenzstaudruck in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit  $v_{ref}$

Für die Auslegung müssen nach AP 1.2 drei verschiedene Windgeschwindigkeiten in Betracht gezogen werden:

1. Überlebensfall in Schlafposition ( $\Phi = 90^\circ$ ) mit  $v_{ref} = 33 \text{ m/s}$  →  $q_{ref} = 680 \text{ N/m}^2$
2. Vom Betrieb in Schlafposition ( $\Phi = var.$ ) mit  $v_{ref} = 15 \text{ m/s}$  →  $q_{ref} = 140 \text{ N/m}^2$
3. Betriebsfall ( $\Phi = var.$ ) mit  $v_{ref} = 10 \text{ m/s}$  →  $q_{ref} = 63 \text{ N/m}^2$

### 5.3.3 Torsionsmomente

Tordierende Lasten resultieren aus

<sup>2</sup> Forman, P.; Kämper, Ch.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Paraboschalen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016, Heft 12, S. 851-861.

- Ball joints (0,65 kNm jeweils an den Kollektorenden, vgl. AP 1.2)
- Lagerreibung (0,2 kNm je Modul, vgl. AP 1.2)
- Ungleichgewicht (0,5 kNm je Modul, vgl. AP 1.2)
- Windbeanspruchungen (variable aufgrund der Auslenkung)

Das Torsionsmoment der Ball joints wird i. d. R. über verstärkte Absorberaufhängungen direkt in die Schale eingeleitet und für den globalen Torsionsansatz nicht weiter berücksichtigt. Eine Überprüfung der lokalen Lasteinleitung muss dennoch erfolgen.

Die Torsionsmomente aus Windbeanspruchungen sind von der Auslenkung und Windstärke abhängig und werden bei der Berücksichtigung mehrere Module hintereinander geschalteter Module aufsummiert. Vereinfachend wurden die resultierenden Torsionsmomente für die Windlastbeanspruchung auf ein Modul berechnet ohne Parabelkrümmung zu berücksichtigen. Die resultierenden Torsionsmomente infolge auslenkungsbedingter Windbeanspruchung sind in Tabelle 1.4.3 gegebene.

*Tabelle 1.4.3: Torsionsmomente infolge Windbeanspruchung*

		Torsionsmoment MT [kNm]		
		Auslenkung [°]		
v [m/s]	q [N/m²]	45	90	135
10	63	6.5	-4.1	-7.5
15	141	14.6	-9.3	-16.9
33	681	70.5	-44.9	-81.9

### 5.3.4 Schneelasten

Für die Prüfstatik des Demonstrators war standortbedingt (Borchen, NRW) der Ansatz von Schneelasten erforderlich. Diese wurden mit einer charakteristischen Schneelast von

$$s_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

Schneelasten können nur in der Schutzposition (fixiert in 90° Auslenkung) anfallen (kein Betrieb bei Schneefall). Aufgrund der Krümmung wird die Schneelast in Bereichen der Schale nach DIN EN 1991-1-3 mit einer Steigung 30°-40° um den Faktor  $\mu_1 = 0,67$  abgemindert.

## 5.4 Genauigkeitsanforderungen

Die Wirksamkeit eines Kollektors wird über den Interceptfaktor bestimmt, der die Qualität der Solarstrahlenkonzentration beurteilt. Um die nötigen Genauigkeitsanforderungen bereits im Formfindungsprozess zu berücksichtigen, ist in Rücksprache mit der DLR ein Wirksamkeitskriterium zur Dimensionierung angesetzt worden, welches auf statistischen Erfahrungswerten des EuroTrough beruht (Abbildung 1.1.1.5.5). Pottler<sup>3</sup> hat für den EuroTrough Kollektor verschieden Einflüsse auf die Solarstrahlabweichung zusammengestellt und daraus die Wirksamkeit abgeleitet (Abbildung). Darauf basierend ist ein Verformungskriterium für die Schalenoberfläche entwickelt worden, welches auf der Begrenzung des quadratischen Mittelwerts des Parabelsteigungsfehlers  $SD_{x,rms}$  (in Bezug auf eine ungestörte Parabelform)

<sup>3</sup> Pottler, K.; Ulmer, S.; Lüpfer, E.; Landmann, M.; Röger, M.; Prah, C.: Ensuring performance by geometric quality control and specification for parabolic trough solar fields. Energy Procedia 49 (2014), pp. 2170-2179.

von 1,5-2 mrad infolge äußeren Einwirkungen beruht. So wird rechnerisch ein Interceptfaktor von 98% erreicht wird.

Table 1: Example of beam spread and total geometric quality for a EuroTrough collector geometry.  
The diagram illustrates the percentage share of the various error causes on the total beam spread.

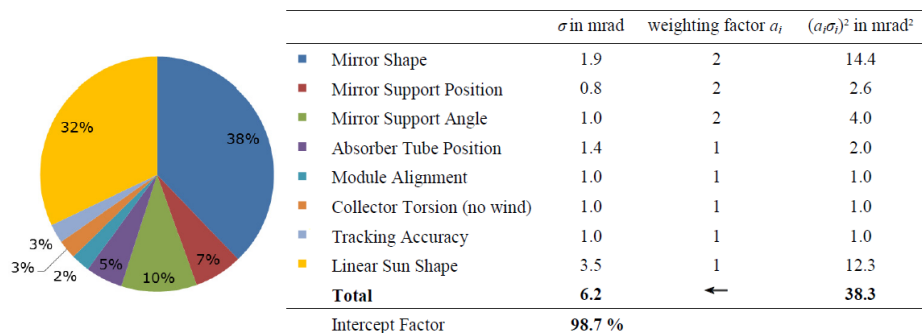


Abbildung 1.1.1.5.5: Einflüsse auf die Solarstrahlabweichung am Beispiel des EuroTrough Kollektors<sup>3</sup>

## 5.5 Dimensionierungskonzept

Zustand	Beanspruchungen	Restriktion
Überlebensfall	Erhöhte Windbeanspruchung für die Kollektorauslenkung mit der geringsten Angriffsfläche ( $\Phi = 90^\circ$ )	Einhalten der zentrischen Zugfestigkeit $f_{ct}$
In Schlafposition fahren	Der Kollektor wird unter mittlerer Windgeschwindigkeit und variabler Kollektorauslenkung in die Schutzposition gefahren ( $\Phi = var.$ )	Einhalten der zentrischen Zugfestigkeit $f_{ct}$
Betriebszustand	Der Kollektor wird unter gemäßigter Windbeanspruchung der Sonne nachgeführt zur maximalen Energiegewinnung	Genauigkeitsanforderungen müssen erfüllt sein

## 6. Formfindung

### 6.1 Designstudien

Auf Basis des vorgestellten Dimensionierungskonzepts wurde in einem iterativen Prozess ein vorläufiger Entwurf entwickelt, der auf dem Modell mit den geometrischen Randbedingungen nach Tabelle 1.1.1.5.1 beruht. Im Laufe des Entwurfsprozesses hat sich herausge-

stellt, dass wesentliche Steifigkeitsanforderungen in Querrichtung erforderlich sind, sodass als ad-hoc Maßnahme die Sicheln als Lagerung der Schale vergrößert wurden, indem der Radius von 1,71 m auf 2,10 m angepasst wurde. Mit einer Schalendicke von 5,5 cm im Scheitel und 3,5 cm am Rand und einer Randauskragung von 10 cm konnte für den Betriebszustand sowohl die Genauigkeitsanforderung als auch die Spannungsbegrenzung rechnerisch für ein Einzelmodul sichergestellt werden. Das Gesamtgewicht einer Schale (ohne äußere Sicheln entspricht dabei ca. 9 t. Der Querschnitt dieses Vorentwurfs ist in Abbildung 1.1.1.6.1 dargestellt.

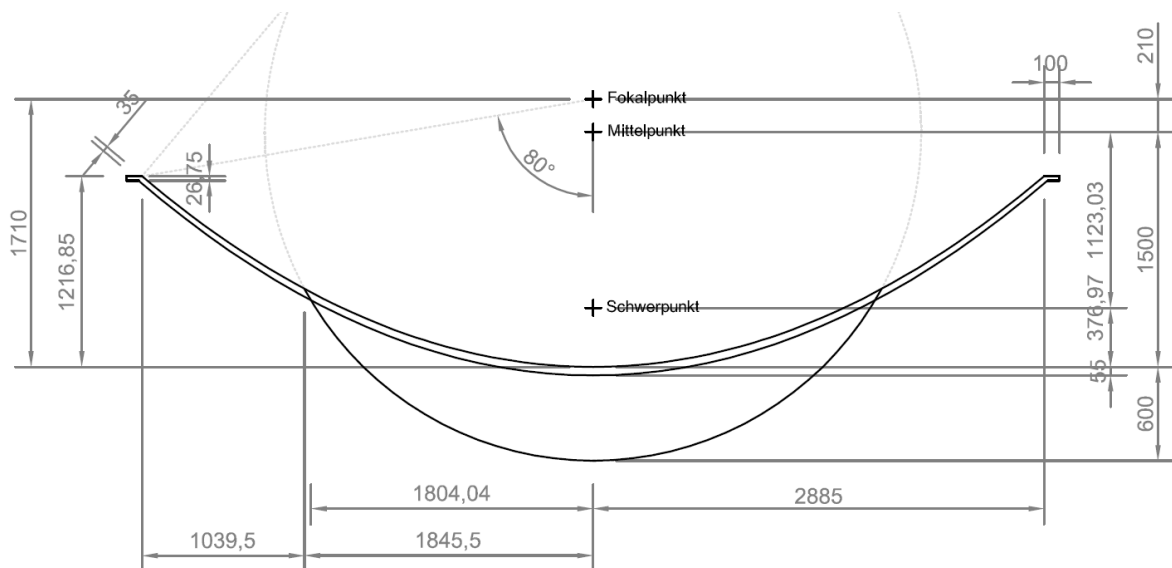


Abbildung 1.1.1.6.1: Querschnitt des ersten, formoptimierten Entwurfs

Herkömmliche Stahlkollektoren besitzen zumeist Längen von bis zu 150 m, wozu mehrere, hintereinandergeschaltete Module zentral über einen Antrieb gesteuert werden. D. h., Torsionsbeanspruchungen summieren sich über die Länge, von Modul zu Modul, auf. Aufgrund der sehr schlanken Betonschale, welche einen vergleichsweise geringen Torsionswiderstand besitzt, konnte in numerischen Simulationen nachgewiesen werden, dass lediglich zwei Betonkollektormodule über einen zentralen Antrieb, welcher sich dann zwischen den Modulen befindet, angetrieben werden können, um die nötigen Genauigkeitsanforderungen einzuhalten. Um diese Doppelmodule zu einem Kollektorstrang zu verbinden, ist der Antrieb so ausgelegt worden, dass dieser sich mit weiteren Antrieben synchronisieren kann. Aus Symmetriegründen kann eine Bemessung für lediglich ein Modul erfolgen, jedoch muss bei der Auslegung des Antriebs Beanspruchung aus zwei Modulen beachtet werden.

## 6.2 Entwurf und Bemessung

Die Parabol-Schale soll als einwandige Schale mit zum Rand verjüngendem Querschnitt (5,5 – 3,5 cm) erstellt werden. Der Antrieb befindet sich am Anfang eines jeden Moduls. In weiteren Analysen hat sich gezeigt, dass eine auskragende Randverstärkung nicht erforderlich ist. Zudem wurde der Lagerabstand angepasst, um eine gleichmäßigere Lastverteilung und somit auch geringer Verformungen zu bewirken (Abbildung 1.1.1.6.2).

Für weitere Untersuchungen sowie für die Festlegung der Abrollgeometrie ist die Lage des Schwerpunkts erforderlich. Dieser bestimmt sich für ein Modul, inkl. Receiver, Receiveraufhängungen und äußeren Kreissegmenten der Lagerung mit einer Stärke von 10 cm, zu

$z_s = 0,3453 \text{ m}$  (bei 25°C) bzw.

$z_s = 0,3436 \text{ m}$  (bei 350 °C)

vom Parabelscheitel aus.

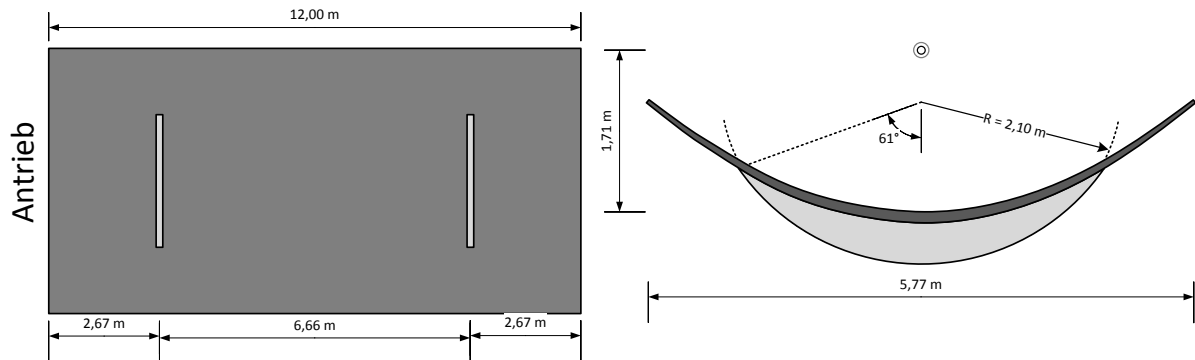


Abbildung 1.1.1.6.2: Draufsicht und Querschnitt der Schale

### 6.2.1 Genauigkeitsanalyse

Die Überprüfung der rechnerischen Wirksamkeit erfolgt für den maßgebenden Lastfall für eine Kollektorauslenkung von 45°, da hier die maximalen Windlasten auftreten. Vergleichsrechnungen bestätigen dies. Die Genauigkeitsanalyse zeigt, dass der Maximalwert des Steigungsfehlers  $SDx_{rms}$  im Bereich von 1,5-2,0 mrad eingehalten wird (Abbildung 1.1.1.6.3).

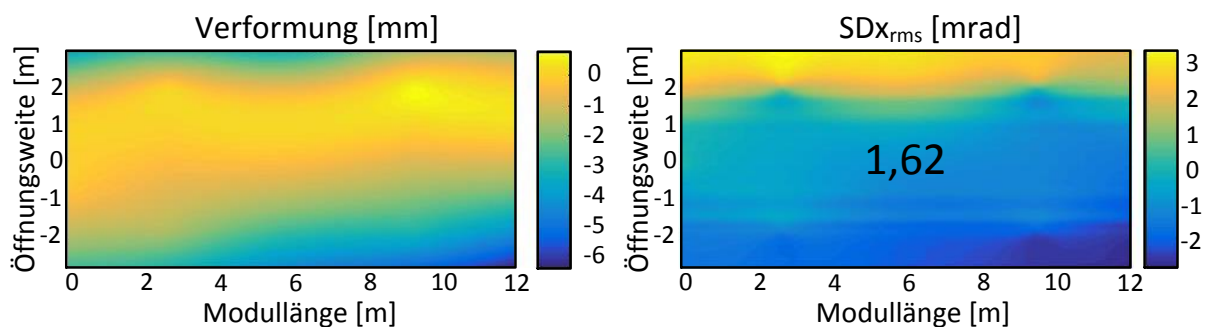


Abbildung 1.1.1.6.3: Verformung und zugehöriger Steigungsfehler  $SDx$

### 6.2.2 Bemessungsgrundlage - Sicherheitskonzept

Zur Sicherstellung eines duktilen Versagens ist eine Bewehrung nötig. Die wird auf Basis des Teilsicherheitskonzepts nach Eurocode ermittelt.

#### Sicherheitskonzept $E_d \leq R_d$

Einwirkungen:  $E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k,1} + \sum \gamma_Q \psi_{0,i} Q_{k,i}$

mit:  $\gamma_G = 1,35$  (Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten)

$\gamma_Q = 1,50$  (Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten)

$G_k$  charakteristische ständige Last

$Q_k$  charakteristische veränderliche Last

Ständige Lasten sind das Eigengewicht. Veränderliche Lasten sind die Windbeanspruchungen sowie die Torsionsbeanspruchungen. Da diese auch gleichzeitig auftreten können, wird auf eine Reduzierung von nicht leiteinwirkenden Lasten durch den Faktor  $\psi_0$  verzichtet.

Windbeanspruchungen sind nach Abschnitt 5.3 für eine Windgeschwindigkeit von  $v_{ref} = 15$  m/s bei variabler Kollektorauslenkung und mit  $v_{ref} = 33$  m/s für den Starkwindzustand bei konstanter Kollektorauslenkung ( $\Phi = 90^\circ$ ) angesetzt. Das gesamte auf das Modul einwirkende Torsionsmoment entspricht 1,35 kNm.

Widerstand:  $R_d = R_k / \gamma_R$

Als Widerstand wird konventioneller Bewehrungsstahl B500 als Matten bzw. Stabstahl (M + S) angesetzt. Der Designwiderstand der Fließdehnung bestimmt sich zu:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ N/mm}^2$$

Mit:  $\gamma_s = 1,15 \text{ N/mm}^2$  (Teilsicherheitsbeiwert)

$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$  charakteristische Fließdehnung

### Spannungsermittlung und resultierende Schnittgrößen

Die Spannungen, welche in der Schale über die Dicke resultieren, lassen sich in einen konstanten Anteil  $\sigma_N$  und einen linear veränderlichen Anteil  $\sigma_M$  einteilen (Abbildung 1.1.1.6.4).

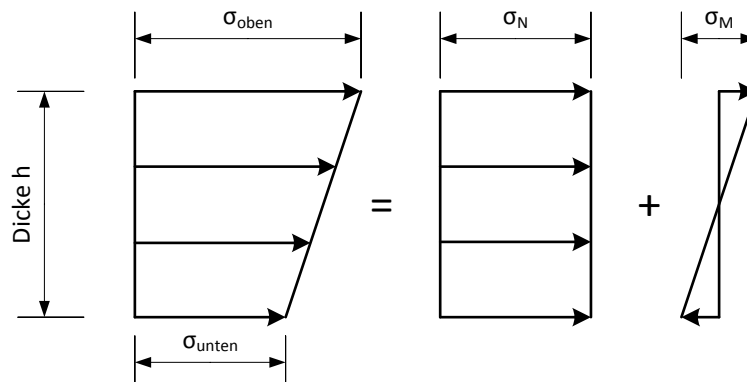


Abbildung 1.1.1.6.4: Zusammensetzung der Spannung in der Schale

Aus den Spannungsanteilen lassen sich für die Schnittgrößen, Normalkraft und Biegemoment, in der Schale bestimmen:

Normalkraft:  $N = \sigma_N \cdot h$  [kN/m]

Moment:  $M = \pm \frac{1}{12} \sigma_M h^2$  [kNm/m]

Für die 5 Kollektorauslenkung (10, 45, 90, 135, 170°) lassen sich die Schnittgrößen der Schale für die y-Richtung (quer) und x-Richtung (längs) bestimmen. Für die 90°-Auslenkung wird nur der maßgebende Starkwindzustand berücksichtigt (Abbildung 1.1.1.6.5).

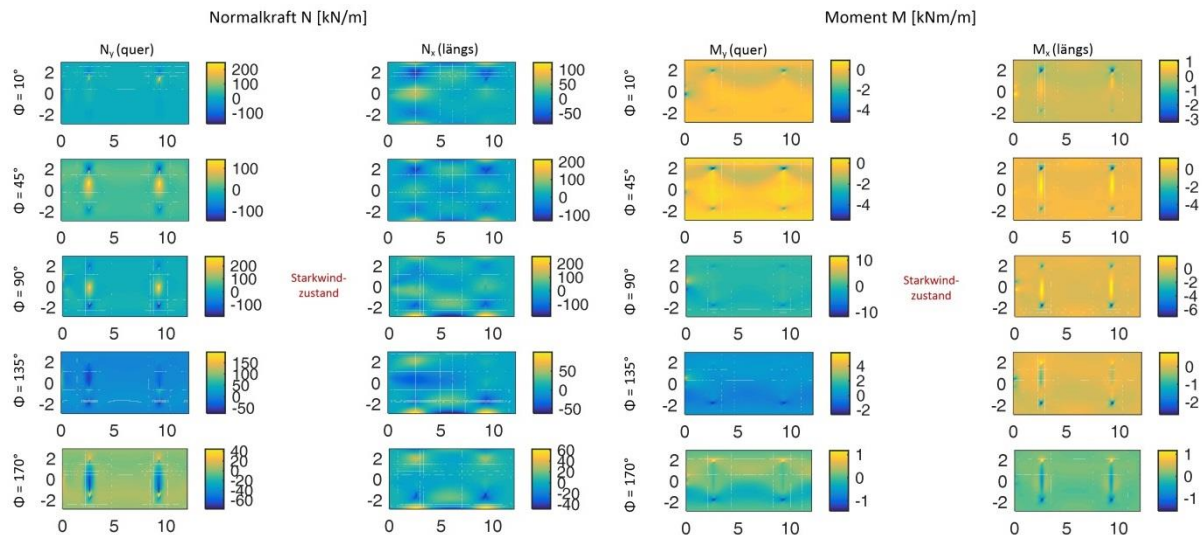


Abbildung 1.1.1.6.5: Schnittgrößen

Maßgebliche (Zug-)Normalkraftbelastungen entstehen in x-Richtung der Schale, insbesondere an den Rändern auf Höhe der Rolllager. Maßgebliche Momentbeanspruchungen resultieren in Schalenquerrichtung. Lastspitzen, infolge numerischer Singularität, können an den linienartigen Lagerungen sowie dem Antrieb am Schalenanfang ausgemacht werden.

Aus den Schnittgrößen lassen sich die drei wesentlichen Schnittgrößenkombinationen jeweils für beide Raumrichtungen ermitteln:

- Maximale Normalkraft mit zugehörigem Moment ( $N_{Ed,max}, M_{Ed,Nmax}$ )
- Minimales Moment mit zugehöriger Normalkraft ( $M_{Ed,min}, N_{Ed,Mmin}$ )
- Maximales Moment mit zugehöriger Normalkraft ( $M_{Ed,max}, N_{Ed,Mmax}$ )

#### Bewehrungskonzept und –ermittlung

Die Bewehrungsführung soll einlagig erfolgen. Dazu wird die Normalkraft im Querschnitt auf die Bewehrungslage bezogen, was eine zusätzliche Momentbeanspruchung zur Folge hat, welche mit dem eigentlichen Moment zum Bemessungsmoment  $M_{Eds}$  überlagert werden muss. Die in der Schale auftretenden Momente sind größtenteils negativ, sodass eine obere Bewehrungslage angeordnet wird. Aufgrund der größeren Momentenbeanspruchungen in Querrichtung wird die Querbewehrung randnah verlegt. Die jeweiligen Bemessungsmomente  $M_{Eds}$  bestimmen sich dann für die x- und y-Richtung nach Abbildung 1.1.1.6.6.

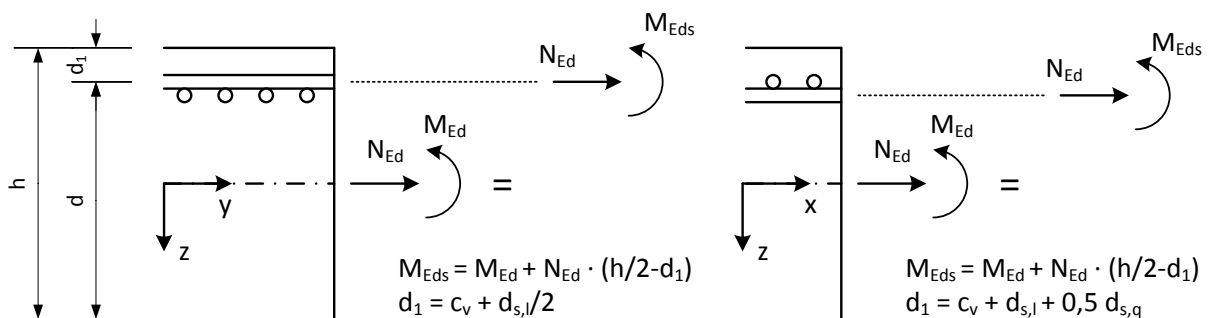


Abbildung 1.1.1.6.6: Bestimmung der Bemessungsschnittgrößen



Dabei wird eine Betondeckung von  $c_v = 1,0 \text{ cm}$  angesetzt. Als Bewehrung wird eine Q188 ( $a_{s,x} = a_{s,y} = 1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) Bewehrungsmatte angenommen mit Stabdurchmessern von  $d_{s,l} = d_{s,q} = 6 \text{ mm}$ .

In Abhängigkeit des Bemessungsmoments wird zwischen zwei Bemessungsansätzen unterschieden, die in Abbildung 1.1.1.6.7 dargestellt sind.

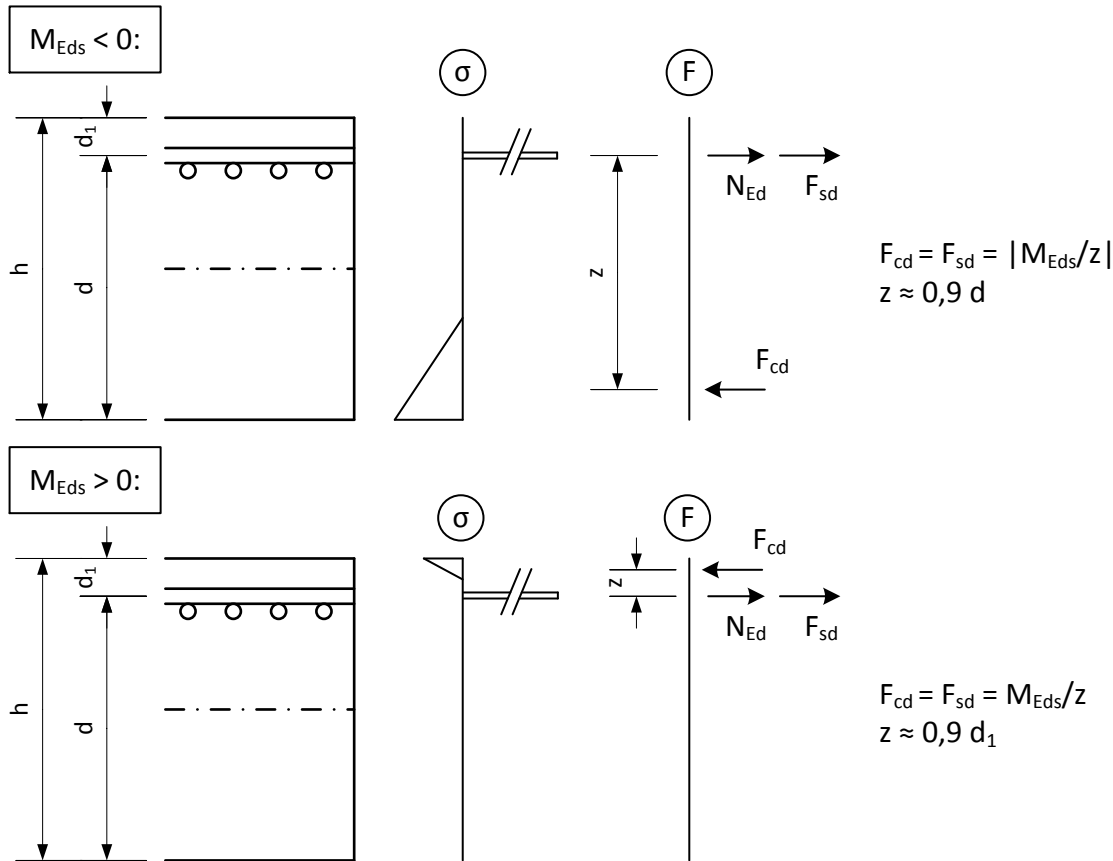


Abbildung 1.1.1.6.7: Bemessungsansätze für negative und positive Momentenbeanspruchung

Dabei wird der innere Hebelarm  $z$  zwischen den beiden inneren Kraftgrößen – Betondruckkraft  $F_{cd}$  und Zugkraft der Bewehrung  $F_{sd}$  – konservativ abgeschätzt und variiert je nach Vorzeichen des Bemessungsmoments. Die erforderliche Bewehrung ergibt sich zu

$$\text{erf } a_s = \frac{1}{f_{yd}} \left( \frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} \right)$$

Aus den zuvor definierten drei maßgebenden Schnittgrößenkombinationen können so die erforderlichen Bewehrungen bestimmt werden. In Abbildung 1.1.1.6.8 ist die Maximalwert-Auswertung dargestellt.

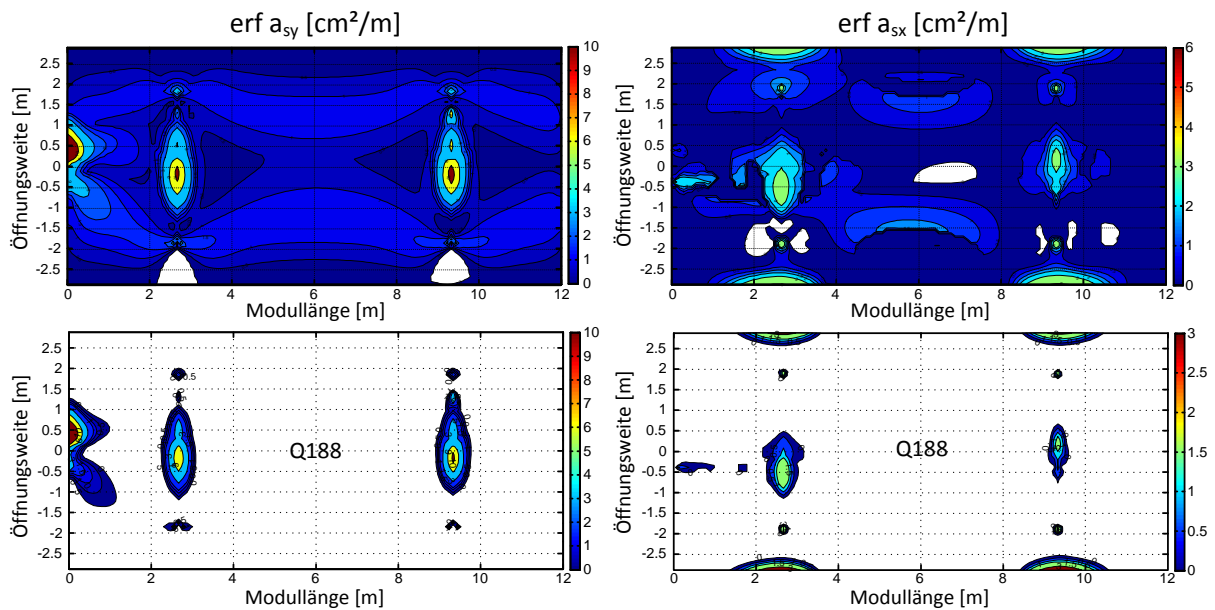


Abbildung 1.1.1.6.8: Erforderliche Bewehrung (oben) und erforderliche Zulagebewehrung bei Ansatz einer Q188 Bewehrungsmatte (unten)

Dabei zeigt sich, dass wesentliche Bereiche der Schale durch die angesetzte Q188 Mattenbewehrung abgedeckt werden können. Auf der sicheren Seite wird hier jedoch eine Q257 Mattenbewehrung angesetzt. Lediglich aufgrund von Spannungsspitzen sind im Bereich der Auflager lokal zusätzliche Bewehrungen erforderlich (Pos. 1 & 2). Auch sind mögliche Lastspitzen in den Eckbereichen infolge Windbeanspruchungen bisher nicht berücksichtigt und werden konstruktiv, durch eine umlaufende Bewehrung berücksichtigt (Pos 3 a,b), welche gleichzeitig die Randkräfte in x-Richtung aufnimmt. Im Bereich der Lastangriffspunkt des Antriebs resultieren ebenfalls hohe erforderliche Bewehrungsanteile, welche hier durch eine flächige Erhöhung der Bewehrung mit einer Q335 Bewehrungsmatte und Zulagebewehrung am Rand (Pos. 3 c) abgedeckt wird. Eine Skizze der erforderlichen Zulagenbewehrung ist in Abbildung 1.5.9 gegeben.

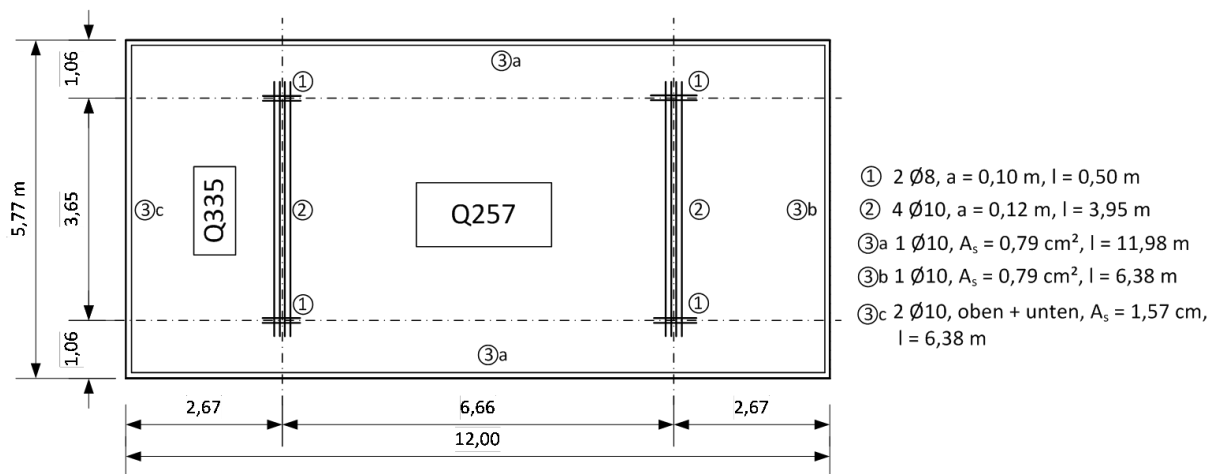


Abbildung 1.1.1.6.9: Bewehrungsverteilung

## 6.3 Finales Design des Demonstrators

Der so dimensionierte Kollektor hat den Nachteil, dass Kräfte des Antriebs direkt in die schlanke Schale eingeleitet werden müssen. Um dies zu vermeiden wurde in einem letzten Optimierungsschritt die Lagersituation so verändert, dass eine Sichel je Modul zum Rand verschoben wird und dadurch die Antriebskräfte über die Sichel in die Schale eingeleitet werden können. Dies bietet den Vorteil, dass keine punktuellen Lasten direkt in die dünne Schalenstruktur eingeleitet werden müssen. Eine erneute Dimensionierung und Bemessung war die Folge.

### 6.3.1 Geometrie

Das Schalentragwerk soll weiterhin als 5,5 – 3,5 cm starke Schale mit einer Apertur von 5,77 m in der Breite und einer Länge von 12,00 m ausgeführt werden. Die Kreissegmente sollen an der Schalenaußenseite mithilfe von 2 Verbindungsbolzen und den in der Schale eingebrachten „Orbitern“ verschraubt werden. Der Radius der Kreissegmente beträgt 2,10 m, bei einer Dicke von 0,15 m. Die Auflagerung erfolgt am Schalenrand sowie in 8 m Abstand. Die wesentlichen geometrischen Maße in Querschnitt und Draufsicht für ein Modul sind in Abbildungen 1.1.1.6.10 und 1.1.1.6.11 gegeben. Der gesamte Kollektor besteht aus zwei dieser Module welche am randnahen Auflager gespiegelt werden. Hier liegt auch der Antrieb, welcher in den Kreissegmenten angreift.

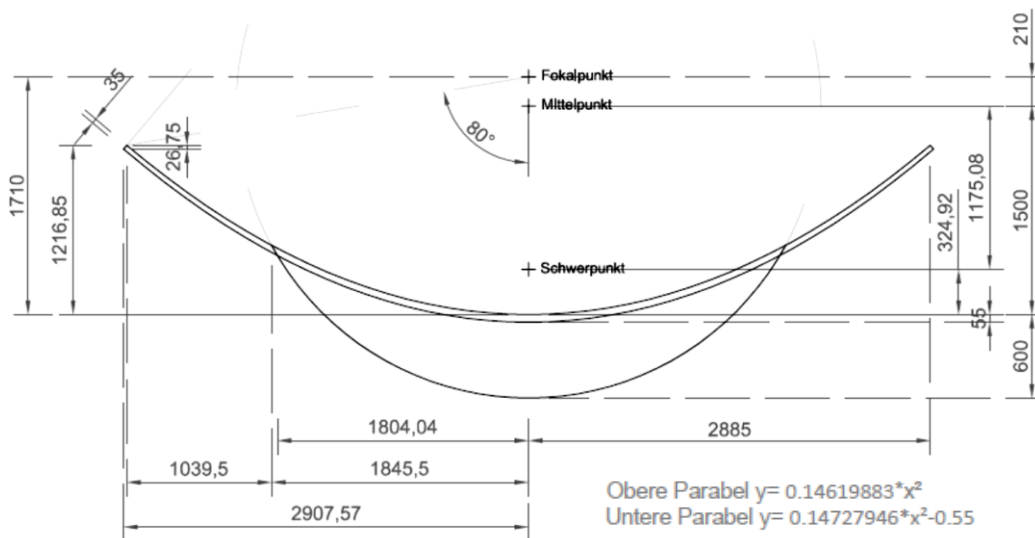


Abbildung 1.1.1.6.10: Querschnitt der Schale

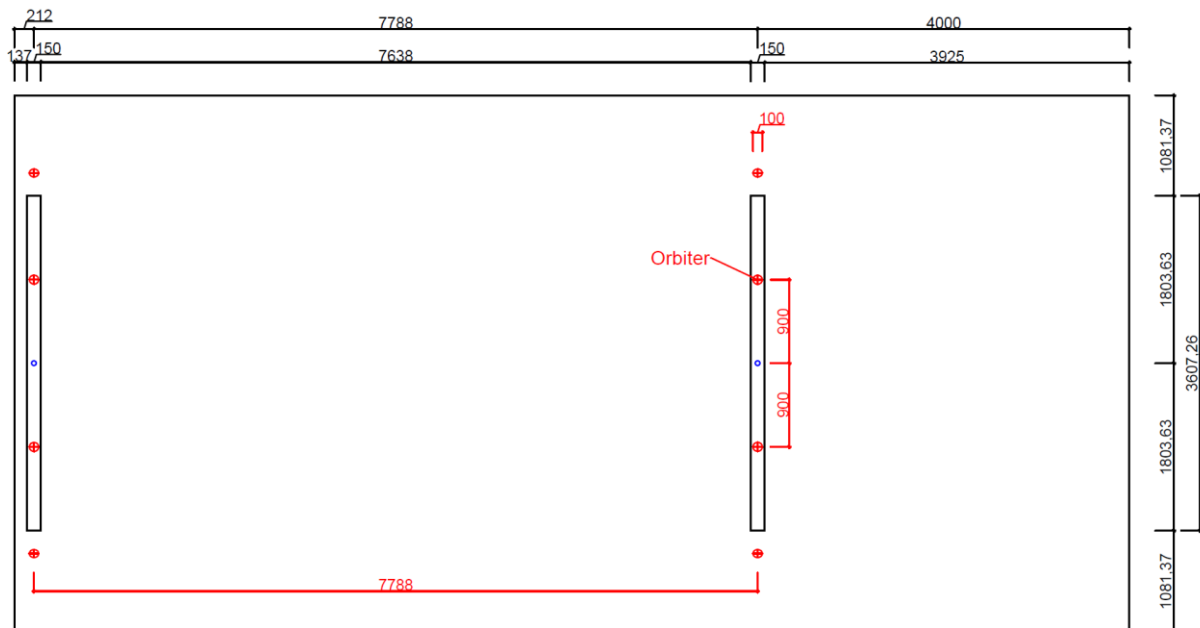


Abbildung 1.1.1.6.11: Draufsicht auf die Schale

### 6.3.2 Genauigkeitsanalyse

Durch die Verschiebung eines Auflagers an den Rand der Schale, hat sich das Längssystem in ein Einfeldträger mit Kragarm abgewandelt, was einen vergrößerten Feldbereich von 8 m Länge nach sich zieht. Daher sind im Vergleich zum vorher definierten Einzelmodul als Einfeldträger mit zwei Kragarmen mit größeren Verformungen und auch reduzierter Genauigkeit zu rechnen. Dies zeigt sich auch in der Analyse der Verformungen und des Steigungsfehlers (Abbildung 1.1.1.6.12). Mit einem quadratischen Mittelwert  $SDx_{rms}$  von 2,08 mrad liegt dieser geringfügig über dem Grenzwert von 2,0 mrad. Die Überschreitung wird aber als vernachlässigbar gering für die prototypische Umsetzung gesehen.

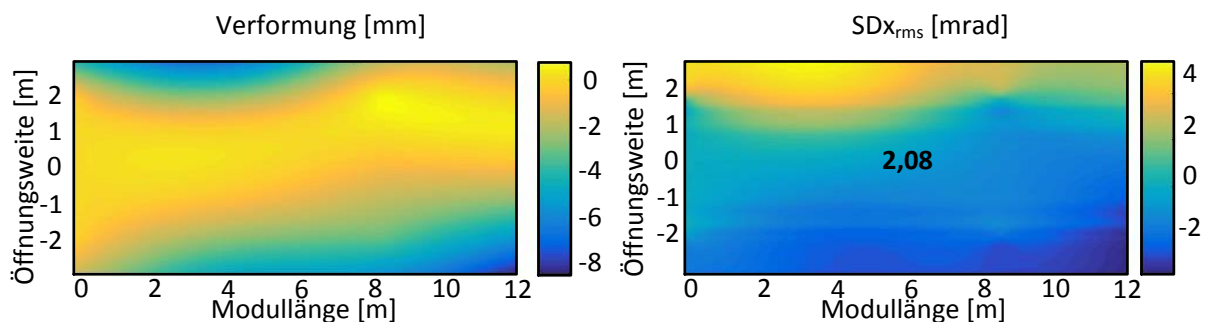


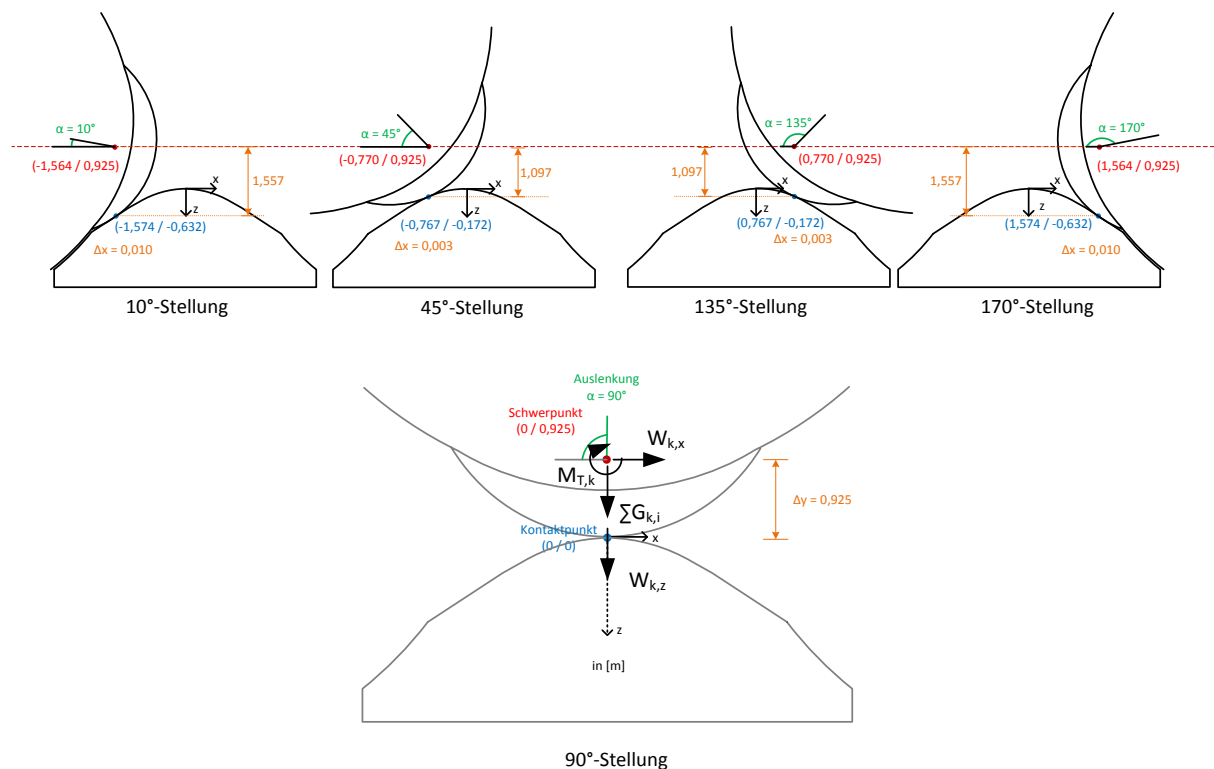
Abbildung 1.1.1.6.12: Verformung und Steigungsfehler für das

### 6.3.3 Spezifische Beanspruchungen im GZT

Die spezifischen Beanspruchungen sind als globale Lasten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit in Tabelle 1.1.1.6.1 angegeben. Für die Mittagsstellung, welche gleichzeitig den Überlebenszustand bildet, ist zudem eine zusätzliche Schneelast für den Aufbaustandort Paderborn angesetzt. Für typische Standorte von Parabolrinnenkollektoren, i. d. R. ohne Schneelasten, ist diese nicht zu beachten. Die hier bestimmten globalen Lastgrößendichten u.a. der Dimensionierung der Unterbauten und des Antriebs.

Tabelle 1.1.1.6.1: Globale Lastgrößen je Modul (nach Abbildung 1.1.1.6.13)

			Kollektorauslenkung $\Phi$				
			10°	45°	90°	135°	170°
<b>Vertikallasten [kN]</b>							
Eigengewicht	Schale	$G_{k,Schale}$	88.58				
	Segmente	$G_{k,KS}$	10.79				
	Receiver	$G_{k,Rec}$	1.77				
Wind	15 m/s	$W_{k,z}$	0.21 / -0.25	29.37	9.74	1.06	-0.25 / 0.21
	33 m/s	$W_{k,z}$	-	-	47.32	-	-
Schneelasten		$S_{k,z}$	-	-	46,67	-	-
Hebelarm zum KP [m]		$\Delta x$	0.01	0.003	0	0.003	0.01
<b>Horizontallasten [kN]</b>							
Wind	15 m/s	$W_{k,x}$	27.11 / -9.98	24.22/-13.21	+/- 4.89	13.2/-22.24	9.98/-27.11
	33 m/s	$W_{k,x}$	-	-	+/- 23.73	-	-
Hebelarm zum KP [m]		$\Delta z$	1.557	1.097	0.925	1.097	1.557
<b>Torsionsmomente [kNm]</b>							
Eigenlasttorsion		$M_{T,k,EG}$	+/- 0.51				
Wind	15 m/s	$M_{T,k,Wind}$	-0.81	-14.03 / 14.12	+/- 7.87	14.12/ -14.03	-0.37
	33 m/s	$M_{T,k,Wind}$	-	-	+/- 38.2	-	-
Lagerreibung		$M_{T,k,Lager}$	+/- 0.2				
REPA		$M_{T,k,Repa}$	+/- 0.65				



### 6.3.4 Bemessung im GZT

#### Biegung mit Normalkraft

Die Bemessung des Doppelmoduls für Biegung mit Normalkraft erfolgte simultan zu Abschnitt 6.2. Die ausführliche Nachweisform kann der geprüften Statik entnommen werden. Die daraus resultierende Bewehrungsverteilung ist Abbildung 1.1.1.6.14 dargestellt.

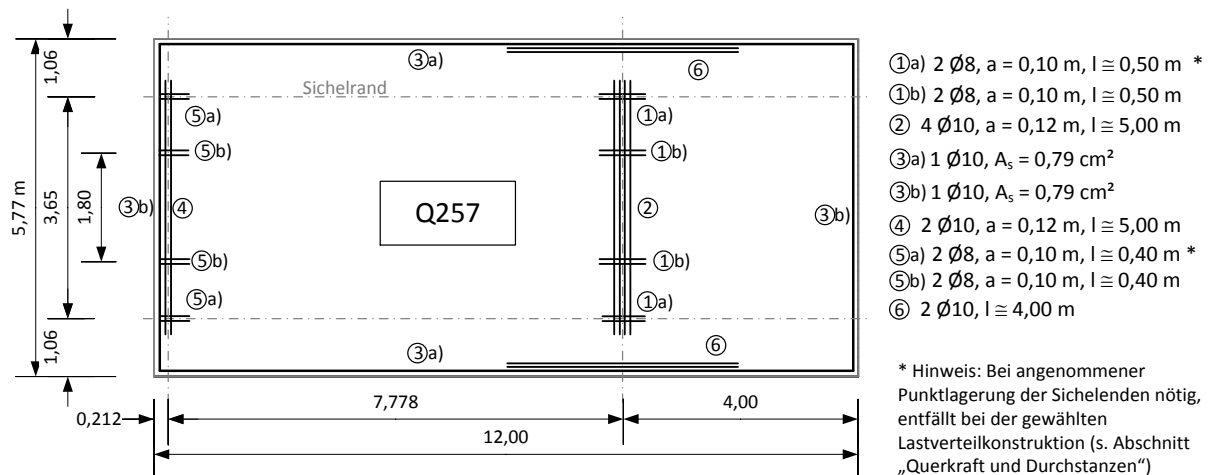


Abbildung 1.1.1.6.14: Bewehrungsverteilung

Grundsätzlich wird die Schale mit einer Q257 Matte mit einer Betondeckung von 1 cm ab Schaleninnenseite bewehrt. In den Bereichen der Auflagersegmente und Einbauteile („Orbiter“) ist aufgrund hoher Spannungsspitzen Zulagebewehrung erforderlich.

## 7. Statische Berechnung und Ausarbeitung wesentlicher Detaillösungen für die Konstruktion in AP 1.2

### 7.1 Querkraft und Durchstanzen

Die Schale ist über die Kreissegmente gelagert. Dies resultiert in einer Querkraftbeanspruchung über das Kreissegment mit erhöhten Belastungen an den Rändern. In Abbildung 1.1.1.7.1 ist der Verlauf der Querkraftbeanspruchung für den maßgebenden Lastfall am Lager dargestellt. Die Querkraftbeanspruchung der freien Schale ist gering.

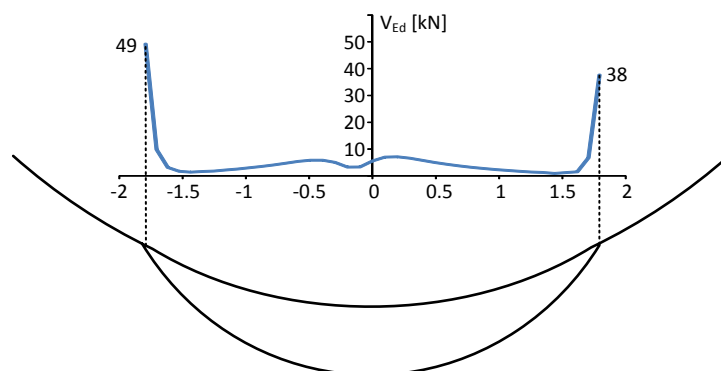


Abbildung 1.1.1.7.1: Verlauf der Auflagerkraft zwischen Schale und Kreissegment über dem Mittelauf-  
lager

Aufgrund der erhöhten Beanspruchung wird ein Durchstanznachweis am Rand des Kreis-  
segments geführt. Dabei gilt:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd}$$

Als Widerstand wird konservativ nur der minimale Durchstanzwiderstand angesetzt, welcher  
aus der Betondruckfestigkeit abgeleitet wird:

$$v_{Rd} = v_{min} = \frac{0,0525}{\gamma_c} \sqrt{k^3 f_{ck}}$$

$$\text{Mit: } \gamma_c = 1,35$$

$$k = 2,0$$

$$f_{ck} = 100 \text{ N/mm}^2$$

Daraus resultiert ein Widerstand von  $v_{Rd} = 1,10 \text{ N/mm}^2$ . Da die tatsächliche Zugfestigkeit  
des verwendeten Betons weitaus größer ist als die des angenommenen, wird der Widerstand  
um den Verhältniswert  $f_{ctm}/f_{ctm,C100/115} = 9,4/5,2 = 1,8$  erhöht. Der resultierende Wider-  
stand entspricht:

$$v_{Rd} = 1,8 \cdot 1,10 = 2,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Einwirkung bestimmt sich zu:

$$v_{ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d}$$

$$\text{Mit: } \beta = 1,35$$

$$V_{Ed} = 49 \text{ kN}$$

$$d > 4 \text{ cm}$$

Um ein Durchstanzversagen zu verhindern, muss das Kreissegment an den Rändern aufge-  
weitet werden. Dafür wird der erforderliche Umfang des kritischen Rundschnitts ermittelt:

$$u_{i,erf} = V_{Ed} \cdot \frac{\beta}{v_{Rd} \cdot d} = 0,049 \cdot \frac{1,35}{2,00 \cdot 0,04} = 0,83 \text{ m}$$

Es wird eine Lastverteilung mit den äußeren Abmessungen von 20 x 30 cm mittig an den  
Rändern der Kreissegmente sowohl an den Mittel- als auch Randauflagern angeordnet (Ab-  
bildung 1.1.1.7.2). Dieses hat einen kritischen Rundschnitt am Mittelaufleger von

$$u_i = 95 \text{ cm} > u_{i,erf} = 83 \text{ cm}$$

Für das Randaufleger entspricht der kritische Rundschnitt 68,7 cm, wobei hier die einwirken-  
de Belastung nur 1/3 der Belastung am Mittelaufleger entspricht, sodass auch hier der  
Nachweis erfüllt ist.



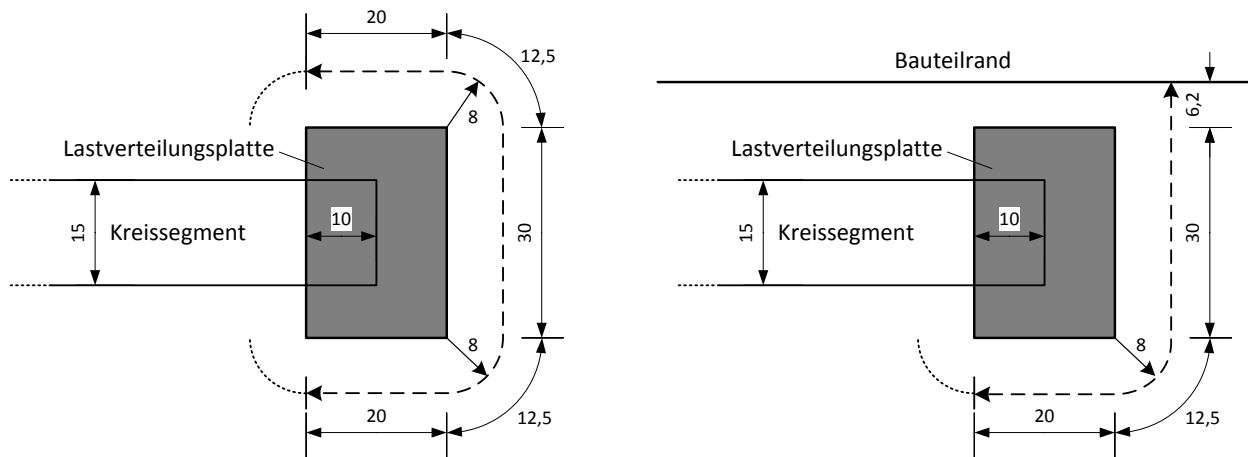


Abbildung 1.1.1.7.2: Lastverteilungsplatte an den Kreissegmenträndern in Draufsicht mit kritischem Rundschnitt für da Mittel- (links) und Randaufleger (rechts)

## 7.2 Anschlüsse

### Verbindung Schale - Kreissegmente

Das Kollektormodul besteht aus einer Schale mit Kreissegmente, welche jeweils über zwei Verschraubungen sowie eine zusätzliche Verklebung verbunden werden. Die Verschraubungen erfolgen mithilfe von sogenannten „Orbitern“, welche als Einbauteil in der Schale angeordnet werden (Abbildung 1.1.1.7.3). Diese sind Stahleinbauteile, welche aus zwei Rundstahlplatten mit mittigem Gewinde bestehen.

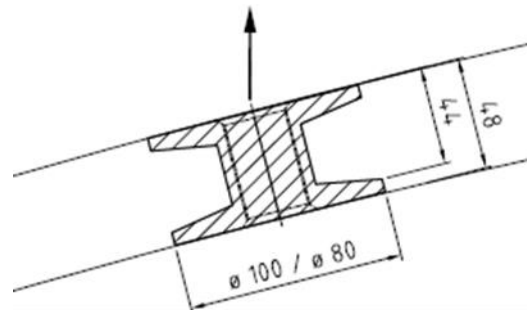


Abbildung 1.1.1.7.3: Prototyp „Orbiter“ der Fa. Pfeifer

Die äußeren Kreissegmente werden über Gewindebolzen PAP30 der Fa. Pfeifer angeschlossen (Abbildung 1.1.1.7.4Abbildung). Dazu werden in den Kreissegmenten Hülrohre  $\varnothing 40$  eingebaut.

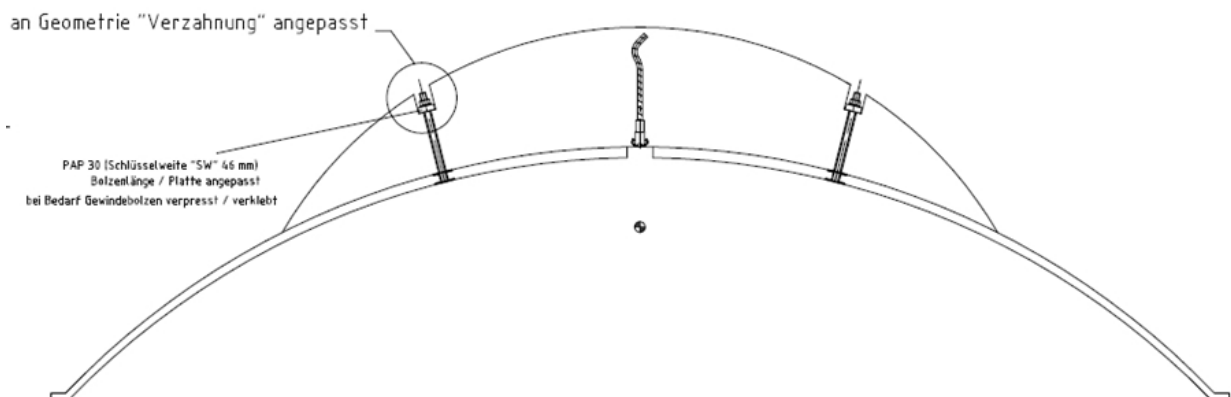


Abbildung 1.1.1.7.4: Anschluss der Kreissegmente

Der Lastabtrag von Druckkräften erfolgt über den Kontakt der einzelnen Elemente, gesichert durch Verschraubung mithilfe von Verbindungsbolzen PAP der Fa. Pfeifer. Maßgebende Beanspruchungen sind Zug- und Querkkräfte. Diese sind maximal für eine Kollektorauslenkung von  $\Phi = 170^\circ$ , da hier die Zugbeanspruchungen auf die Schale nicht durch das Eigengewicht ausgeschaltet werden. Zusätzlich bewirkt das Eigengewicht hier die maximale Querkraftbeanspruchung in der Fuge zwischen Kreissegment und Schale. Nach Abbildung 1.1.1.7.5 (konservativ in  $180^\circ$  Stellung) resultieren dann je Modul folgende Lasten auf die Orbiter 1 und 2:

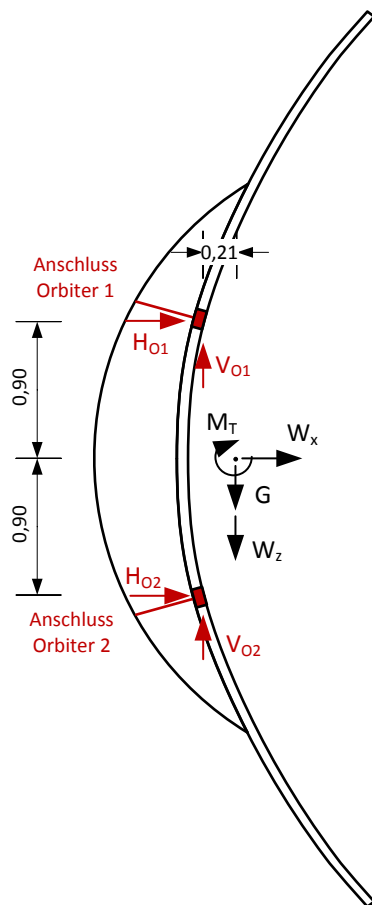


Abbildung 1.1.1.7.5: Einwirkungen Anschluss Kreissegment

- $H_{O1} = 0,5W_x + 0,12(G + W_z) + 0,9M_T$
- $H_{O2} = 0,5W_x - 0,12(G + W_z) - 0,9M_T$
- $V_{O1} = V_{O2} = 0,5(G + W_z)$

Das einwirkende Torsionsmoment wird vereinfachend nur über die Anschlüsse der Orbiter als Kräftepaar abgetragen. Die Vertikalkräfte werden über die Verbindungsbolzen in das Kreissegment abgeleitet

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit resultierenden Kräfte und Momente je Modul bestimmen sich in Abhängigkeit von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu:

$$G_{Ed} = 1,35(88,58 + 1,77) = 121,88 \text{ kN}$$

$$W_{x,Ed} = 1,5 \cdot 9,98 = 14,97 \text{ kN}$$

$$W_{z,Ed} = 1,5 \cdot (-0,25) = -0,38 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,T} = 1,5 \cdot (0,2 + 0,65) = 1,28 \text{ kNm}$$

Daraus resultieren folgende Lasten auf die Anschlüsse für

das Rand- und Mittellauger:

#### Randlager (am Antrieb)

$$H_{Ed,O1} = \frac{1}{4}(0,5 \cdot 14,97 + 0,12 \cdot (121,88 - 0,38) + 0,9 \cdot 1,28) = 5,80 \text{ kN}$$

$$H_{Ed,O2} = \frac{1}{4}(0,5 \cdot 14,97 - 0,12 \cdot (121,88 - 0,38) - 0,9 \cdot 1,28) = -2,06 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,O1} = V_{Ed,O2} = \frac{1}{4} \cdot 0,5 \cdot (121,88 - 0,38) = 15,19 \text{ kN}$$

#### Mittellauger (im Feld)

$$H_{Ed,O1} = 17,41 \text{ kN}$$

$$H_{Ed,O2} = -6,18 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,O1} = V_{Ed,O2} = 45,56 \text{ kN}$$

Die maximale Zugbelastung beträgt somit 17,41 kN, welche über den Durchstanzwiderstand im kritischen Rundschnitt  $v_{Rd} = 2,00 \text{ N/mm}^2$  von der Schale aufgenommen werden muss (Abbildung 1.1.1.7.6). Die Einwirkung im kritischen Rundschnitt ist:

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d} = 0,42 \text{ N/mm}^2$$

Mit:  $\beta = 1,10$

$$V_{Ed} = 17,41 \text{ kN}$$

$$d = 4,9 \text{ cm}$$

$$u_i = 2\pi \cdot \left( \frac{10}{2} + 2 \cdot 4,9 \right) = 93 \text{ cm}$$

Der Nachweis ist somit erfüllt ( $v_{Ed} = 0,42 < 2,00 = v_{Rd}$ ).

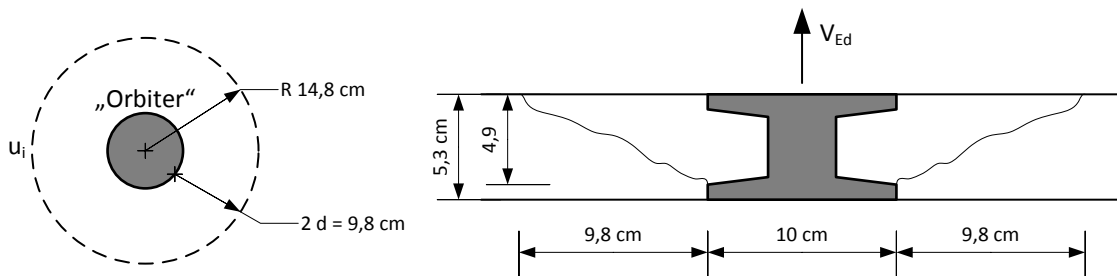


Abbildung 1.1.1.7.6: Drauf- und Ansicht des „Orbiters“ mit kritischem Rundschnitt  $u_i$  und Durchstanzkegel

Zusätzlich wird der Bereich der „Orbiter“ mit je 2  $\varnothing 8$  Bewehrungsstäbe in Längs- und Querrichtung verstärkt.

### Anschluss Receiver

Die Receiver werden über 4 Flachanker als Gruppenbefestigung auf einer quadratischen Platte (13 x 13 cm) der Stärke 1 cm befestigt. Über die Befestigung müssen die Kräfte des Receivers sowie der Aufhängung in die Schale geleitet werden. Die maximalen Belastungen auf die Befestigung treten bei einer Auslenkung von  $\Phi = 0^\circ$  bzw  $180^\circ$  auf (Abbildung 1.1.1.7.7).

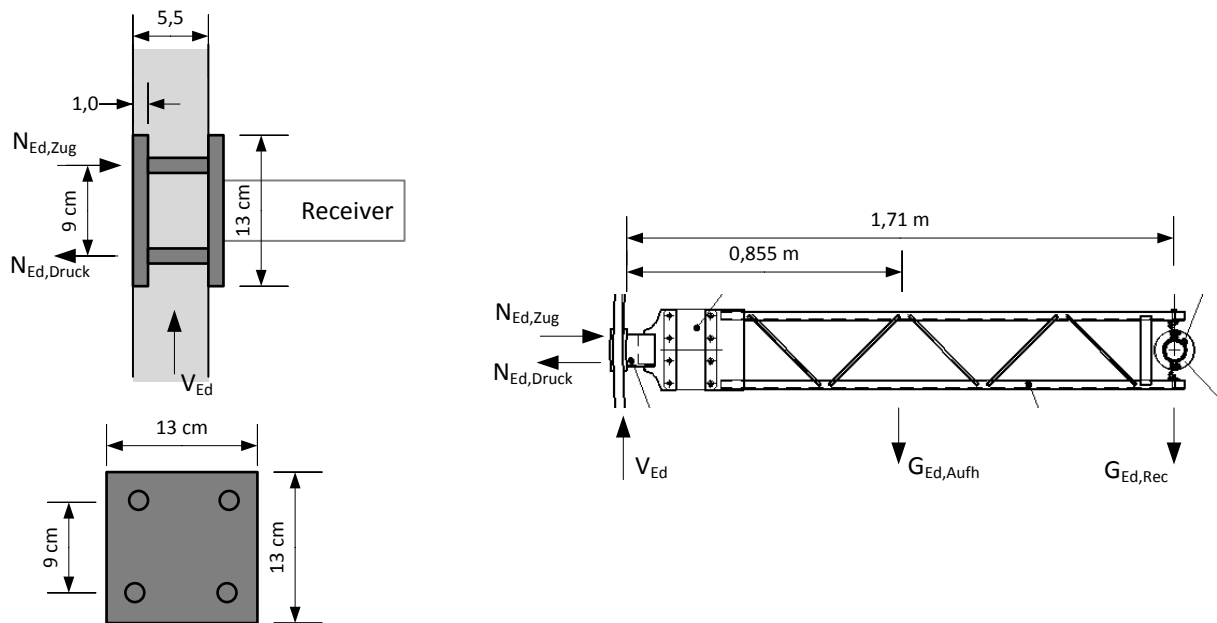


Abbildung 1.1.1.7.7: Geometrie der Befestigung und Lasten

Die Receiver sind alle 4 m je im Scheitelpunkt der Schale (Dicke 5,5 cm) befestigt. Daraus resultieren die Bemessungslasten je Befestigung:

- Aufhängung:  $G_{Ed,Aufh} = 1,35 \cdot 0,133 = 0,18 \text{ kN}$
- Receiver:  $G_{Ed,Rec} = 1,35 \cdot 0,455 = 0,62 \text{ kN}$

Daraus resultieren die folgenden Lasten auf die Lastplatte:

$$N_{Ed,Zug} = -N_{Ed,Druck} = 13,37 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 0,80 \text{ kN}$$

Dabei sind zwei Anker unter Zug und zwei Anker unter Druck. Die Querkraft wird über die gedrückten Anker aufgenommen werden. Die maximalen Bemessungslasten je Anker sind:

$$\max N_{Ed} = 6,70 \text{ kN}$$

$$\max V_{Ed} = 0,40 \text{ kN}$$

Gewählt werden Flachstahlanker Rd 16 der Firma Pfeifer mit einer zulässigen Kraft für zentrischen Zug sowie Querkzug von  $\text{zul. } F_Z = \text{zul. } F_Q = 12 \text{ kN}$ .

Der Querkraftnachweis der Betonschale stellt ein unsymmetrisches Durchstanzproblem dar (Abbildung 1.1.1.7.8).

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d}$$

Mit:  $\beta = 1,35$

$$V_{Ed} = N_{Ed, Zug} = 13,37 \text{ kN}$$

$$d = 4,5 \text{ cm}$$

$$u_i = 13 + 2 \cdot 6,5 + \pi \cdot 9 = 54 \text{ cm}$$

$$v_{Ed} = 0,74 \leq 2,00 = v_{Rd}$$

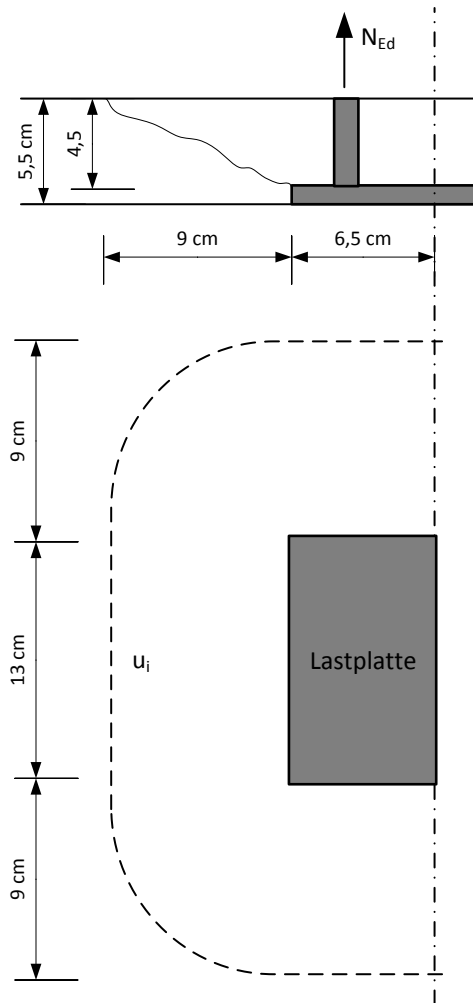


Abbildung 1.1.1.7.8: Durchstanzen der Receiver-Lastplatte

## 8. Betonversuche zur Ermittlung der Auswirkung verschiedener Schalöle auf die Klebwirkung

### 8.1 Ausgangsstoffe und Kennwerte des Betons

Für die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die von der TU Kaiserslautern vorgegebene Betonzusammensetzung verwendet. Diese ist in Tabelle 1.1.1.8.1 abgebildet.

Tabelle 1.1.1.8.1: Betonzusammensetzung nach Vorgabe TU Kaiserslautern

Ausgangsstoffe	Menge [kg/m³]
Nanodur Compound 5941 weiß (davon 614,78 kg Bindemittel)	1042
Rheinsand 0/2	426

Basaltsplitt 1/3	882
Wasser (w/z-Wert = 0,28)	160
Fließmittel Glenium ACE 430 (3,3 % vom Bindemittelgehalt)	20,3
Schwindreduzierer Eclipse Floor	8
Erhärtungsbeschleuniger X-SEED 100 max	24,6

Zunächst wurden die maßgebenden Frisch- und Festbetonkennwerte der Betonzusammensetzung ermittelt und die Sedimentationsstabilität des Frischbetons untersucht. Die Frischbetonkennwerte sowie die Zielvorgaben der TUKL sind in Tabelle 1.1.1.8.2 zusammengefasst. Die Vorgaben sind mit minimalen Abweichungen durchweg erfüllt worden. Es konnte eine deutliche Abhängigkeit der  $t_{500}$ -Zeit von der Temperatur der Ausgangsstoffe (i.d.R. 8 °C) festgestellt werden. Bei einer Temperatur der trockenen Ausgangsstoffe von 16 °C lag die  $t_{500}$ -Zeit im Mittel bei ca. 17,1 Sekunden. Wurden die trockenen Ausgangsstoffe auf 8 °C gekühlt so lag die  $t_{500}$ -Zeit im Mittel bei 13,2 Sekunden.

*Tabelle 1.1.1.8.2: Frischbetonkennwerte*

<b>Kenngröße</b>	<b>Einheit</b>	<b>Zielwert (TUKL)</b>	<b>Wert (RUB)</b>
Luftporengehalt nach 20 min	[%]	1,4	1,0 - 1,3
Frischbetonrohddichte nach 20 min	[kg/dm³]	2,46	2,50
Setzfließmaß nach 25 min	[mm]	850	870
$t_{500}$ -Zeit nach 25 min	[s]	18	13,2 – 17,1
Frischbetontemperatur nach 1 min	[°C]	24,3	22,2

An den untersuchten Probekörpern konnte bei Verwendung des vorgegebenen Fließmittelgehalts (3,3 M.-% v. Zement) eine Sedimentationsneigung festgestellt werden. Die Sedimentationsneigung wurde hierzu an den Bruchflächen eigens hergestellter Prismen (40 x 40 x 160 mm³) begutachtet. Abbildung 1.1.1.8.1 links zeigt den Querschnitt eines Probekörpers mit einem Fließmittelgehalt von 3,3 M.-% v. Zement. An der Einfüllseite ist ein Bereich von 1-3 mm zu erkennen, in dem kaum grobe Gesteinskörnung sichtbar ist. Gleichzeitig ist an der Unterseite des Probekörpers eine Anreicherung an grober Gesteinskörnung ersichtlich. Davon ausgehend, dass die Sedimentation aufgrund der hohen Fließmitteldosierung entsteht wurde diese sukzessive angepasst um eine Sedimentation zu vermeiden. Beim gleichen Beton, jedoch mit einem reduzierten Fließmittelgehalt von nur mehr 2,0 M.-% v. Zement zeigte sich nur eine geringe Sedimentation der groben Gesteinskörnung (vgl. Abb. 1.1.1.8.1 rechts). Das Absenken des Fließmittelgehalts auf 2,0 M.-% v. Zement hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Hingegen zeigten sich bei einer weiteren Absenkung des Fließmittelgehalts deutlich ungünstigere Frischbetoneigenschaften, was gleichzeitig mit einer schlechteren Verarbeitbarkeit des Frischbetons einherging. Für die weiteren Untersuchungen wurde daher der Fließmittelgehalt zu 2,0 M.-% v. Zement festgelegt.

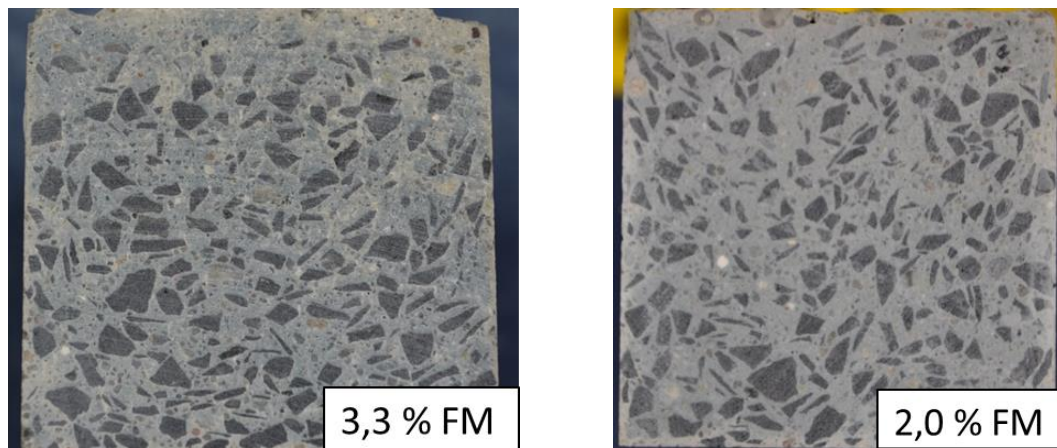


Abbildung 1.1.1.8.1: Querschnittsfläche eines Probekörpers mit 3,3 M.-% v. Zement Fließmittel (links) und Querschnittsfläche eines Probekörpers mit 2,0 M.% Fließmittel v. Zement (rechts)

Nach Adaption des Fließmittelgehalts wurden an verschiedenen Probekörpern die Festbetonkennwerte Druck- und Biegezugfestigkeit nach DIN EN 196-1 und DIN EN 12390-3, sowie der Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13 bestimmt. Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden zylindrische Probekörper ( $d = 150 \text{ mm}$  und  $h = 300 \text{ mm}$ ) hergestellt. Die dabei ermittelten Kennwerte dieses Hochleistungsbetons können Tabelle 1.1.1.8.3 entnommen werden. Die erreichten Druckfestigkeiten  $> 120 \text{ N/mm}^2$  liegen in einem Bereich sehr deutlich über dem eines herkömmlichen Betons. Ebenso ist die erzielte Biegezugfestigkeit mit im Mittel  $18,9 \text{ N/mm}^2$  überdurchschnittlich hoch. Besonders das Verhältnis der Biegezugfestigkeit zur Druckfestigkeit ist verglichen mit Normalbeton bedeutend größer als das bei Normalbeton. Des Weiteren liegt korrespondierend dazu der Elastizitätsmodul über dem für Normalbeton gängigen Bereich.

Tabelle 1.1.1.8.3: Festbetoneigenschaften

Eigenschaft	Einheit	Mittelwert der Ergebnisse	Kennwerte für Normalbeton
Biegezugfestigkeit ( $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]	18,9	0 - 5
Druckfestigkeit ( $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]	121,8	5 -55
Druckfestigkeit ( $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,1	5 -55
Druckfestigkeit ( $d = 150 \times 300 \text{ mm}$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,1	5 - 55
Elastizitätsmodul ( $d = 150 \times 300 \text{ mm}$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]	52.700	22.000 – 40.000

## 8.2 Verbund zwischen Spiegel und Beton

Zur Beurteilung der Klebwirkung zwischen Spiegel und Beton wurde ein einaxialer Haftzugversuch konzipiert. Hierbei wurden zunächst großformatige Betonplatten ( $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$ ) hergestellt. Nachdem der Beton erhärtet ist wurde der zu untersuchende Kleber dünn auf den Beton aufgebracht und dann der Spiegel mit weichen Gummirollen gleichmäßig angedrückt. Vor der Haftzugprüfung wurde der zu untersuchende Probekörper mittels Säge-

schnitten geviertelt, so dass Proben mit den Abmessungen 150 x 150 x 50 mm<sup>3</sup> entstanden. Diese Proben wurden anschließend an Ober- und Unterseite mit biegesteifen Stahlplatten beklebt (Abb. 1.1.1.8.2 links). Hierbei wurde ein bewährter Polyurethan-Klebstoff der Fa. MC Bauchemie verwendet (MC-Quicksolid). Die Spiegeloberfläche wurde vor Klebung der Stahlplatte mechanisch aufgeraut. Nach Härtung des Klebers wurden die Probekörper in einer hydraulischen Prüfmaschine eingespannt (Abb. 1.1.1.8.2 rechts) und mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Versagen belastet.

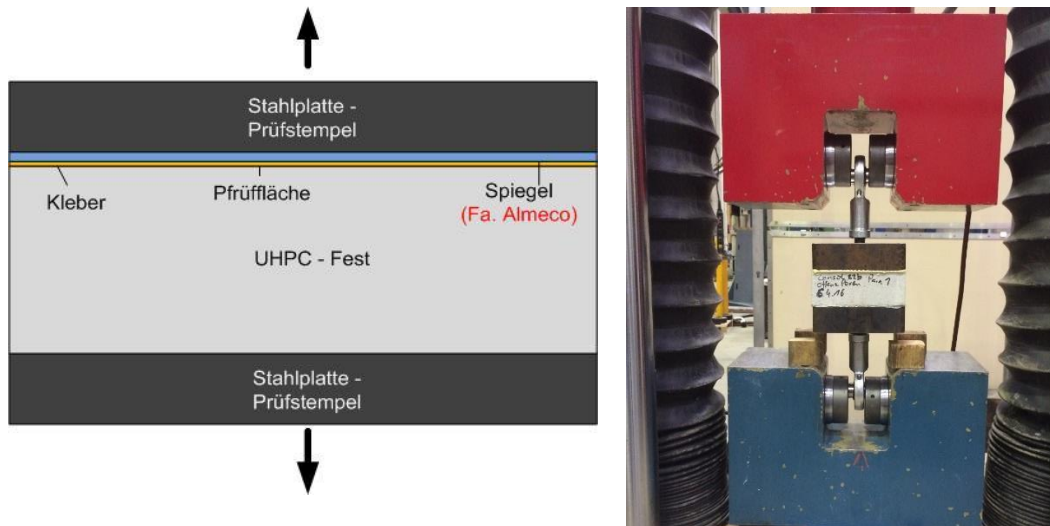


Abbildung 1.1.1.8.2: Schema der Haftfestigkeitsprüfung (links) Haftfestigkeitsprobekörper in der Prüfmaschine (rechts)

Die Betonoberflächen, auf die die Spiegel später aufgeklebt wurden, wurden mit unterschiedlichen Trennmitteln (Schalöl, PTFE) hergestellt, um einen potenziellen Einfluss der Trennmittel auf die Klebwirkung beurteilen zu können. Als Trennmittel wurden zunächst 2 verschiedene Schalöle (EL-Schalöl Classic der Fa. Elvermann und Ortolan Classic 711 der Fa. MC Bauchemie) eingesetzt. Die eingesetzten Schalöle hatten allerdings keinen Einfluss auf die Haftfestigkeit in der Fuge zwischen Kleber und Beton (Abbildung 1.1.1.8.3). Als Alternative zu den eingesetzten Schalölen wurden PTFE-Folien vor der Betonage in die Schalung eingelegt. Hierbei wurde die Dicke der PTFE-Folien zunächst mit 0,1 mm gewählt. Diese war allerdings zu weich um eine glatte Betonoberfläche herzustellen. Die so entstandene unebene Betonoberfläche verhinderte ein ordentliches nachträgliches Kleben der Aluminiumspiegel. Im weiteren Verlauf wurde deshalb eine PTFE-Folie mit einer Stärke von 1,0 mm verwendet.

Bei der Klebung der Spiegel auf die bereits erhärtete Betonoberfläche wurden verschiedene Klebesysteme untersucht. Zunächst wurden Aluminiumspiegel der Fa. Almeco in verschiedenen Dicken (0,3; 0,5 und 0,7 mm) verwendet.

Als Kleber wurden dabei vier verschiedene 2-komponentige Systeme unterschieden:

- Sikasil AS-785 mit Grundierung Sikafloor 156 und Sika Aktivator 205 (alle Fa. Sika)  
2-komponentiger Silikon Kleb- und Dichtstoff
- Scotchweld 7231 (Fa. 3M)  
2-komponentiger Epoxidharzklebstoff
- MS-DUR Flex 1294 mit Grundierung MC-DUR 1200 VK und Voranstrich Mycoflex 4100 TS (Fa. MC-Bauchemie)  
2-komponentiges Epoxidharz-Polyurethan-Beschichtungsstoff



Der gleichmäßige Auftrag dieser Klebstoffe auf den Beton wurde mittels eines feinen Zahnpachtels realisiert. Aufgrund der mitunter aufwendigen Anwendung (Mehrkomponentige Systeme) und den daraus resultierenden Kosten wurde von Fa. Solarlite eine weitere bereits in der Praxis bewährte Klebelösung ins Spiel gebracht. Dabei handelt es sich um doppelseitiges Klebeband der Fa. Tesa. Entsprechende Proben wurden durch Fa. Solarlite zur Verfügung gestellt. Hier variierte die Dicke des Klebebandes zwischen 0,6; 1,1 und 1,6 mm.

Während der Klebung der Spiegel stellten sich bei den dünnen Aluminiumspiegeln (0,3 mm) bei deren Handhabung Schwierigkeiten ein. Aufgrund der geringen Dicken verbogen die Spiegel recht schnell, insbesondere in den Randbereichen und an den Stellen, wo der Spiegel zur Montage festgehalten werden musste. Diese Verformungen ließen sich auch durch das Andrücken mit der Gummirolle in den noch frischen Kleber nicht restlos zurückbiegen. Für die spätere Genauigkeit der Reflexion der Parabolrinne wären solche lokalen Verformungen von negativem Einfluss.

Die Ergebnisse der Haftfestigkeitsprüfung sind in Abbildung 1.1.1.8.3 in Abhängigkeit des verwendeten Klebers, Trennmittels und etwaiger Vorbehandlung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss des Trennmittels bei nachträglicher Klebung aufgrund der Streuung der Einzelwerte vernachlässigbar ist. Bei nachträglicher Klebung der Spiegel mit doppelseitigem Klebeband der Fa. Tesa konnte eine Haftfestigkeit im Mittel von ca. 1,23 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Bei Verwendung der 0,3 mm starken Spiegel der Fa. Almeco zusammen mit dem Klebeband konnte allerdings lediglich eine Festigkeit von ca. 0,3 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden. Hierbei hat sich der Versagensmechanismus aufgrund der geringen Steifigkeit des Spiegelmaterials prüfungsbedingt verändert. Es kam zu einem Versagen am Rand der Klebung und in der Folge zu einem progressiven Abreißen des Spiegels. Bei Klebung des Spiegels mit dem Zweikomponentenkleber MS-DUR Flex 1294 der Fa. MC-Bauchemie konnte eine mittlere Haftfestigkeit von 2,66 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

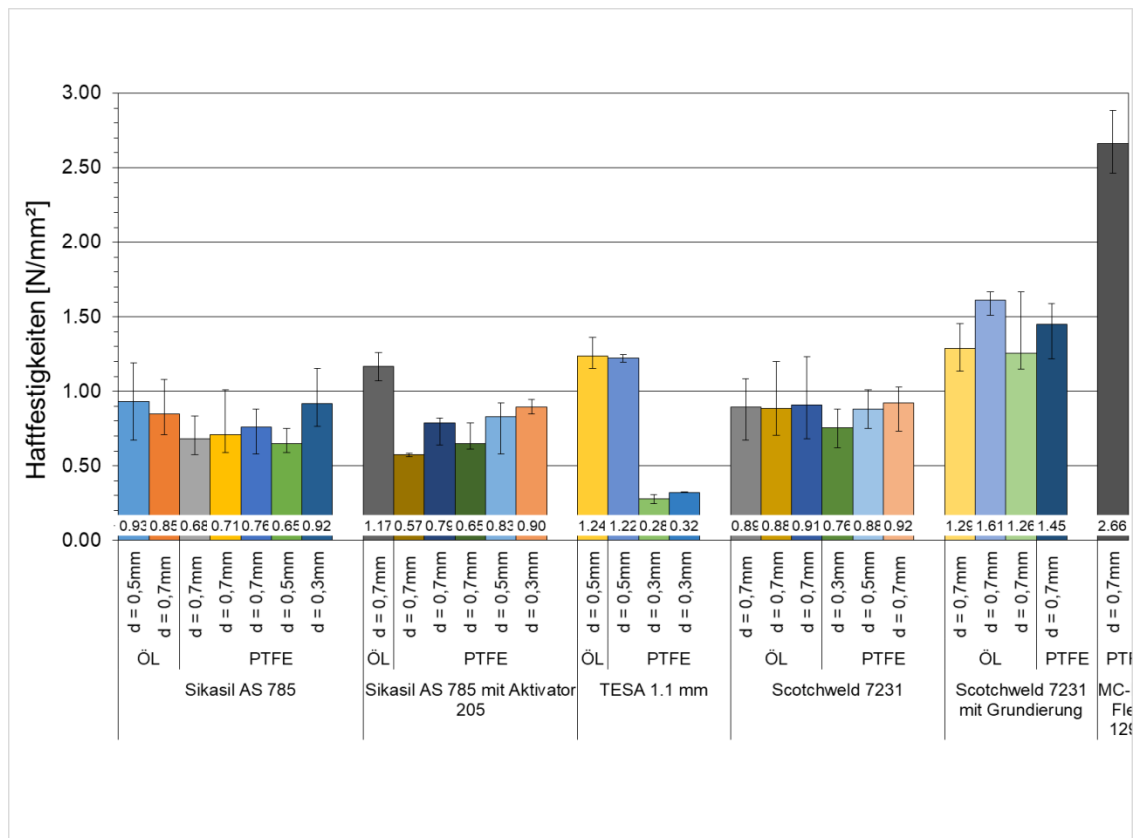


Abbildung 1.1.1.8.3: Haftfestigkeit zwischen Spiegel und Beton in Abhängigkeit von Kleber, Trennmittel und Spiegeldicke

Neben der Ermittlung der Haftfestigkeit verschiedener Klebesysteme wurde die Verklebung mittels doppelseitigem Klebeband der Fa. Tesa, als designierter Kleber in dem Projekt, zyklisch in Klebeebene belastet (Abb. 1.1.1.8.4). Dabei wurden sowohl die Stärke des Klebebandes (0,6; 1,1 und 1,6 mm) als auch die Spiegeldicke (0,5 und 0,7 mm) variiert. Die Belastung in Klebeebene resultiert aus der unterschiedlichen Temperaturverformung, die der Beton und der Aluminiumspiegel wiederfahren. Die unterschiedliche Ausdehnung wird 1-mal pro Tag aufgrund der tageszeitlichen Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Bei einer geplanten Lebensdauer von 25 Jahren dementsprechend 9125-mal. Bei einem angenommenen maximalen Temperaturunterschied von  $\Delta T = \pm 35^\circ\text{C}$  ergibt sich ein maximaler Dehnungsunterschied  $< 0,5\text{ mm/m}$ . Die vorgenannte Verformung ist dabei in Klebeebene mit einer servo-hydraulischen Prüfmaschine weggesteuert bei einer Frequenz von 7 Hz mit 10.000 Wiederholungen induziert worden.

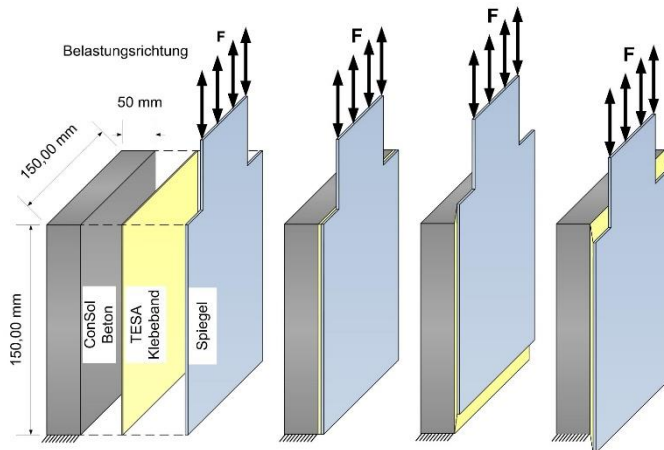


Abbildung 1.1.1.8.4: Zyklische Scherbeanspruchung in Klebeebene

Sämtliche untersuchten Variationen zeigten keinerlei Schädigung nach zyklischer Belastung. Ebenso wurde die Haftfestigkeit orthogonal zur Klebeebene durch die zyklische Belastung beeinträchtigt. Sie betrug sowohl vor als auch nach der Belastung im Mittel ca.  $0,80 \text{ N/mm}^2$ .

Des Weiteren wurde die Scherfestigkeit, also die Belastung in Klebeebene bis zum Versagen ermittelt. Dabei ergab sich eine maximale Festigkeit von ca.  $0,33 \text{ N/mm}^2$  und eine maximale Dehnung von ca.  $6,67 \%$  (vgl. Abb. 1.1.1.8.5).

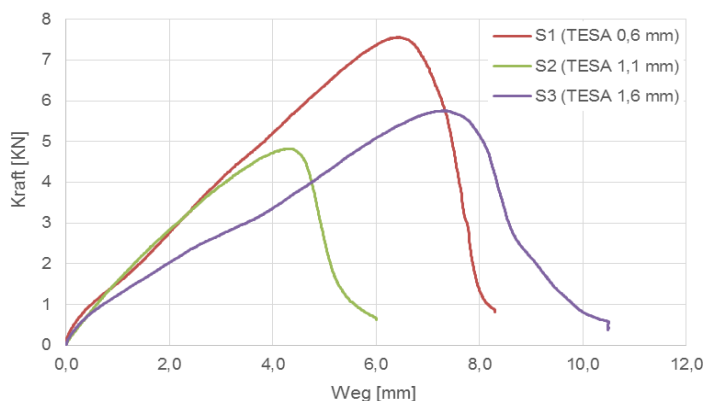


Abbildung 1.1.1.8.5: Scherfestigkeit in Klebeebene in Abhängigkeit der Spiegeldicke

## 9. Betonversuch zur Bestimmung der Klebwirkung bei direkter Betonage auf die Spiegellrückseite

Hinsichtlich eines dauerhaften Verbunds zwischen den Aluminiumspiegeln der Fa. Almeco und dem Beton wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Applikationsmethoden untersucht. Zum einen wurde der Spiegel nachträglich auf den Festbeton aufgeklebt (Kapitel 8), zum anderen wurde der frische Beton direkt auf die Spiegellrückseite betoniert. Bei direkter Betonage auf die Spiegellrückseite konnte ein ausreichender Verbund nicht zielsicher erreicht werden. Aufgrund einer Reaktion zwischen dem frischen alkalischen Beton und der Aluminiumschicht auf der Spiegellrückseite bei der Wasserstoff gebildet wird lag vielfach überhaupt kein Verbund vor. Abb. 1.1.1.9.1 zeigt sowohl die Beton-, als auch die Aluminiumoberfläche nachdem Letztere ohne größeren Kraftaufwand vom Beton abgehoben werden konnte.



Abbildung 1.1.1.9.1: Spiegelrückseite und Betonoberfläche (30 x 30 cm<sup>2</sup>) nach der direkten Betonage gegen die Spiegelrückseite ohne Kleber

Als weitere Option wurde die Betonage gegen eine noch frische Epoxidharzschicht auf der Spiegelrückseite untersucht („Frisch in Frisch“). Dabei diente das Epoxidharz zum einen als Haftbrücke zwischen dem Aluminium und dem Beton, zum anderen verhindert diese Schicht den direkten Kontakt Beton – Aluminium und damit die schädigende Treibreaktion zwischen beiden. In den wenigen Fällen, in denen ein Verbund bei direkter Betonage gegen den Spiegel ohne Trennschicht erzielt werden konnte, lag die Haftfestigkeit (vgl. Abschnitt 8.2) lediglich bei im Mittel ca. 0,30 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Bruchbild Abb. 1.1.1.9.2 links). Die Herstellung eines direkten Verbundes mit einer Epoxidharzschicht auf der Spiegelrückseite zeigte mit im Mittel 0,48 N/mm<sup>2</sup> zwar eine verbesserte, aber nicht hinreichende Haftfestigkeit (vgl. Bruchbild Abb. 1.1.1.9.3 rechts).



Abbildung 1.1.1.9.2: Bruchfläche nach Haftfestigkeitsprüfung ohne Kleber (links) und mit Epoxidharz-Trennschicht (rechts)

Grundsätzlich ist die Herstellung „Frisch in Frisch“ zwar möglich. Vom Produktionsverfahren der gesamten Schale her ist dies bei gekrümmter, großteils geschlossener Schalung nur schwer realisierbar, da der Beton über die noch frische Epoxidharzschicht hinwegfließen müsste.

## 10. Versuchsreihe zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit der Oberfläche gegen Sandstrahlen

Die Parabolrinnen aus Beton sind im Laufe ihrer Nutzung u.U. einem wüstenähnlichen Klima und damit auch Sandstürmen ausgesetzt. Diesbezüglich wurde die Dauerhaftigkeit des Betons hinsichtlich der Beanspruchung durch Sandstürme an potenziellen Standorten erfasst. Die Betonoberfläche wurde mit verschiedenen feinen Strahlgütern (Sand 0,063-0,25 mm und Sand 0,2-1 mm) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten (5, 15 und 25 m/s) im rechten Winkel beansprucht. Die Beanspruchung wurde 1-, 5- und 10-mal wiederholt. Die Oberfläche der Probekörper wurde vor und nach der Belastung mit einem Laser vermessen und ein Hö-

henprofil erstellt. Anhand dessen konnte der Mittenrauwert  $R_a$  nach DIN EN ISO 4287 ermittelt werden. Die Mittenrauwerte für die untersuchten Variationen sind in Abbildung 1.1.1.10.1 dargestellt.

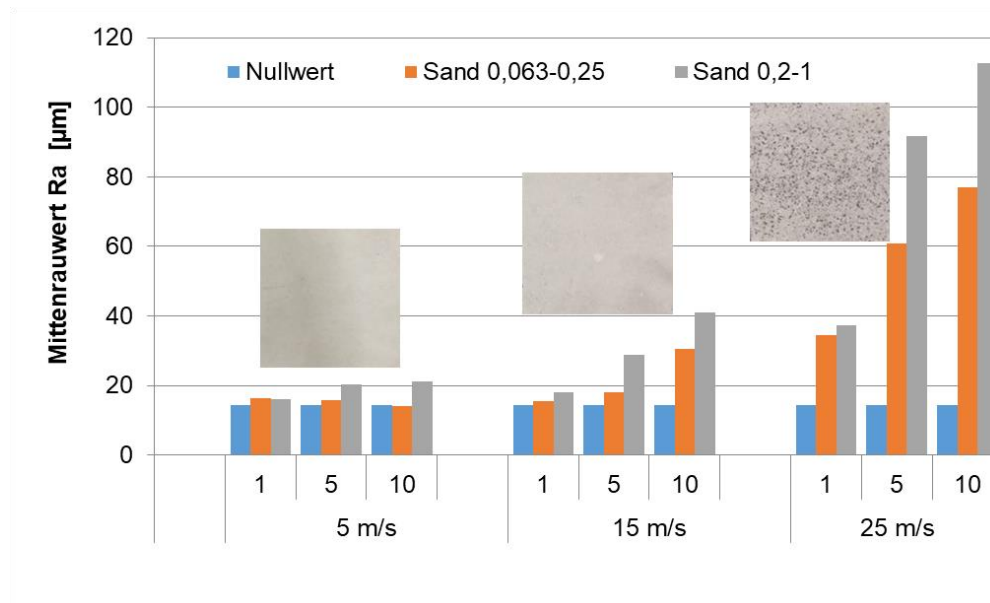


Abbildung 1.1.1.10.1: Mittenrauwert  $R_a$  in Abhängigkeit der Strahlgeschwindigkeit und des Strahlguts sowie der Anzahl der Wiederholungen

Ohne Beanspruchung der Oberfläche durch Sandstrahlen betrug der Mittenrauwert im Mittel  $14,5 \mu\text{m}$  (Nullwert). Bei einer Beanspruchung der Oberfläche mit Strahlgut bei einer Geschwindigkeit von  $5 \text{ m/s}$  änderte sich dieser Wert unabhängig vom Strahlgut und der Anzahl der Wiederholungen nur geringfügig und blieb  $\leq 20 \mu\text{m}$ . Sowohl mit weiter zunehmender Geschwindigkeit des Strahlguts als auch mit größerem Strahlgut nahm der Mittenrauwert zu. Bei einer Strahlgeschwindigkeit von  $15 \text{ m/s}$  stieg der maximale Mittenrauwert (bei 10 Wiederholungen) zunächst auf  $40 \mu\text{m}$  an. Bei der maximalen Beanspruchung ( $25 \text{ m/s}$ , Sand  $0,2\text{--}1 \text{ mm}$ , 10 Wdh.) wurde letztlich ein Mittenrauwert von ca.  $112 \mu\text{m}$  festgestellt.

Auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Klimadaten des Andasol-Kraftwerks (Plataforma Solar de Almeria) in Spanien für die Jahre 2008 bis 2016, lassen sich die typischen Windbeanspruchungen für die Parabolrinne wie folgt eingrenzen: Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit bei Windereignis beträgt dort ca.  $3,5 \text{ m/s}$ , maximal wurde eine Windgeschwindigkeit von ca.  $27,5 \text{ m/s}$  gemessen. Windereignisse mit Windgeschwindigkeiten  $> 25 \text{ m/s}$  traten in dem betrachteten Zeitraum lediglich siebenmal auf und dauerten jeweils weniger als eine Minute. Das heißt, dass solche Windgeschwindigkeiten im Mittel weniger als eine Minute pro Jahr auf die Parabolrinne einwirken. Zieht man nun in Betracht, dass die durchgeführten Untersuchungen durch den Auftrittswinkel des Strahlguts von  $90^\circ$  den ungünstigsten Fall darstellen und dass die maximale Windgeschwindigkeit nur selten und dann nur kurz erreicht wird (vgl. Klimadaten), lässt sich folgern, dass die Betonoberfläche gegenüber üblichen Wind- bzw. Sandeinwirkungen einen ausreichenden Widerstand aufweist.

## 11. Betonversuch zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde in Anlehnung an das BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)“ bestimmt. Das Grundprinzip des Schnellverfahrens basiert auf der Beschleunigung des Ionentransports durch das Anlegen einer elektrischen Spannung. (Abb. 1.1.1.11.1 links) Bei dieser Versuchsanordnung ist der Ionentransport über das elektrische Feld maßgebend und es ergibt sich ein scharfes Chloridprofil, aus dem ein so genannter Migrationskoeffizient  $D_{Cl}$  abgeleitet wird. Nach Einbau der Probekörper ( $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 50 \text{ mm}$ ) werden diese je nach gemessener Anfangsstromstärke für eine bestimmte Zeit mit einer Spannung beaufschlagt. Im Anschluss werden die Probekörper ausgebaut und längs gespalten. Die frischen Bruchflächen werden anschließend mit Indikatorlösungen (Silbernitrat und Kaliumdichromat) zur Visualisierung der eingedrungenen Chloridionen behandelt. (Abb. 1.1.1.11.1 rechts)



Abbildung 1.1.1.11.1: Schema der Chloridmigration (links) und frische Bruchfläche mit Indikatorlösung besprüht

Abbildung 1.1.1.11.2 zeigt den ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten verglichen mit anderen Betonen. Der Mittelwert des Chloridmigrationskoeffizienten aus 3 Proben der untersuchten Betonzusammensetzung unter Verwendung des Nanodur Compounds ergibt sich zu  $3,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Üblicherweise liegt der Chloridmigrationswiderstand für Betone mit guter Widerstandsfähigkeit gegenüber Chloriden zwischen  $3$  und  $12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Somit weist der untersuchte Beton eine um etwa eine 10er-Potenz höhere Widerstandsfähigkeit gegen Chloride auf.



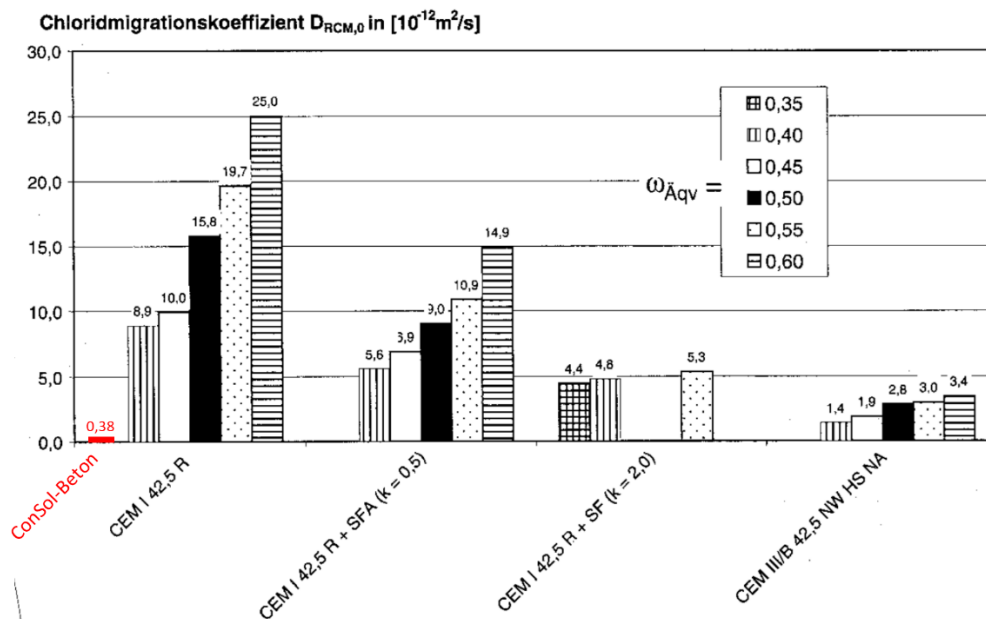


Abbildung 1.1.1.11.2: Chloridmigrationskoeffizient

## 12. Aufstellung einer projektspezifischen Lebensdauerprognose anhand ermittelter Kennwerte

### Bestimmung der Carbonatisierungstiefe

Die Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils wird u.a. durch die Carbonatisierung gefährdet. Wenn im Laufe der Zeit die Randzone des Betons austrocknet und  $\text{CO}_2$ , also Kohlendioxid, aus der Luft eindiffundiert bildet sich aus dem schützenden Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ein Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$  (Kalkstein), der Beton „carbonatisiert“.

Der Verlauf der Carbonatisierungsfront im Beton verläuft wie in Abbildung 1.1.1.12.1 dargestellt. Als vereinfachtes Prognosemodell wird das Wurzelzeitgesetz ( $d_c = a \cdot \sqrt{t}$ ) angesehen. Dieses stellt jedoch eine ungünstige Annahme dar, da sich nach mehreren Jahrzehnten eine Endtiefe im Beton einstellt. Einen ganz entscheidenden Einfluss auf den Carbonatisierungswiderstand eines Betons stellt die Dichtigkeit des Betongefüges dar. Je dichter das Gefüge, desto schwieriger gelangt das für die Reaktion notwendige  $\text{CO}_2$  in den Beton ein. Das Fortschreiten der Carbonatisierung ist weiterhin abhängig von den Umgebungsbedingungen, denen der Beton ausgesetzt ist. Im Wesentlichen spielen die Temperatur und die Feuchte eine gewichtige Rolle. Ein wassergesättigter Beton kann zum Beispiel nicht carbonatisieren, da auch hier das notwendige  $\text{CO}_2$  nicht in den Beton gelangen kann.

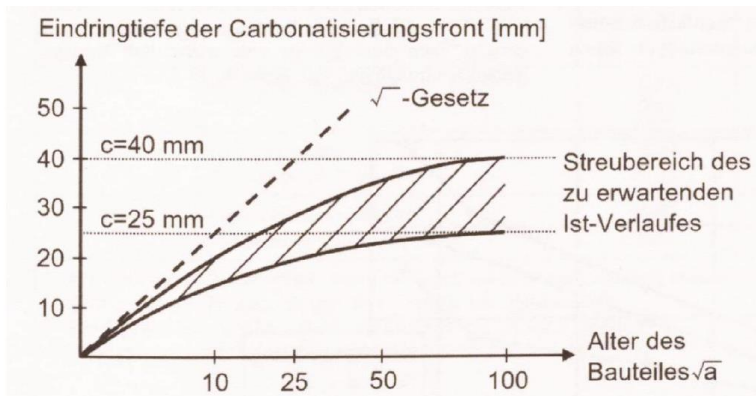


Abbildung 1.1.1.12.1: Fortschritt der Carbonatisierungsfront eines Betons über die Zeit ( $\sqrt{t}$ )

Die Prüfung des Karbonatisierungsverhaltens erfolgte an je 3 Prismen (40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>). Hierzu wurden die Prismen nach der Herstellung für 24 h in der Schalung belassen und im Anschluss unter Normklimabedingungen (20 °C und 65 % rel. F.) gelagert. Der Karbonatisierungsfortschritt wird jeweils in einem Betonalter von 14, 28, 56, 98, 140 und 365 Tagen untersucht. Hierzu wurde eine Phenolphthaleinlösung auf eine frische Bruchfläche appliziert und anhand des resultierenden Farbumschlags der Carbonatisierungsfortschritt gemessen. Die mittlere Carbonatisierungstiefe nach 365 Tagen betrug ca. 0,06 mm (vgl. Abb. 1.1.1.12.2)



Abb. 1.1.1.12.2: Querschnitt eines Probekörpers nach Applikation der Phenolphthaleinlösung im Alter von 365 Tagen

#### Lebensdauerprognose anhand ermittelter Kennwerte

Die Vorhersage des Carbonatisierungsfortschritts nach 25 Jahren für den vorliegenden Beton würde mit dem Wurzel-Zeit-Gesetz eine Carbonatisierungstiefe von im Mittel, ohne Berücksichtigung von Streuungen,  $d_c = 0,3$  mm ergeben. Um eine genauere Prognose zu erhalten kann das in Gl. 1.1.1.12.1 dargestellte Prognosemodell (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 510) verwendet werden. Hierin können die Gegebenheiten am potenziellen Aufstellort der Parabolrinne berücksichtigt werden

$$x_c(t) = \sqrt{(2 \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_s \cdot k_e \cdot k_c)} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t) \quad (1.1.1.12.1)$$



mit folgenden Parametern:

$x_c(t)$ :	Carbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt $t$ [m]
$R_{NAC,0^{-1}}$ :	inverser effektiver Carbonatisierungswiderstand (Normalcarbonatisierungsmethode) [ $m^2/s/kgCO_2/m^3$ ]
$k_e$ :	Parameter zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit [-]
$k_c$ :	Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlungsabhängigkeit [-]
$c_s$ :	$CO_2$ -Konzentrationsgradient [ $kgCO_2/m^3$ ]
$t$ :	Betonalter [s]
$w(t)$ :	Witterungsfunktion [-]

Folgende Annahmen sind dabei für die Prognose getroffen worden:

- Lebensdauer 25 Jahre
- Durchschn. Luftfeuchte 56,33 % (Klimadaten Almeria)
- Regentage pro Jahr 0 (nur Regenereignisse > 2,5 mm, günstige Annahme)
- $CO_2$ -Konzentration 0,00083  $kg/m^3$  (Vergleich mit Deutschland)
- Nachbehandlungsdauer 7d (vgl. Normalbeton)
- Tage mit Wind in Richtung xy bei Regenereignis 1d (nur horizontale Bauteile)

Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich für die angestrebte 25-jährige Lebensdauer eine Carbonatisierungstiefe von im Mittel ohne Berücksichtigung von Streuungen  $x_c = 0,075$  mm. Sowohl die im vereinfachten Modell als auch im genauen Modell prognostizierten Carbonatisierungstiefen stellen im Vergleich zu Normalbeton einen außerordentlich hohen Widerstand gegen das Carbonatisieren dar. Durch das besonders dichte Gefüge des hochfesten Nano-dur-Betons ist mit keiner relevanten Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit durch Carbonatisierung zu rechnen.

Darüberhinaus kann mit Hilfe der Gleichung 1.1.1.12.2 der Chloridgehalt des Betons in der Tiefe  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  prognostiziert werden (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 510). Überschreitet dieser einen kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von  $C_{crit} = 0,4$  M.-%/z (in Abhängigkeit des Zementgehaltes), so kann die Dauerhaftigkeit des Bauteils deutlich beeinträchtigt sein.

$$C(x,t) = C_{S,\Delta x} * (1 - \operatorname{erf}((x - \Delta x) / (2 * \sqrt{(D_{eff,c}(t) * t)}))) \quad (1.1.1.12.2)$$

mit folgenden Parametern:

$C(x,t)$ :	Chloridgehalt des Betons in der Tiefe $x$ zum Zeitpunkt $t$ [M.-%/z]
$C_{S,\Delta x}$ :	Chloridkonzentration in Tiefe $\Delta x$ in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung [M.-%/z]
$x$ :	Tiefe [m]
$\Delta x$ :	Tiefenbereich [m]
$D_{eff,c}$ :	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt $t$ [ $10^{-12} m^2/s$ ]

t:                   Betonalter [s]

Der Parameter  $D_{\text{Eff},c}$  berücksichtigt den in Kapitel 11 ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten  $D_{\text{RCM},0}$  für den ConSol-Beton.

Damit Chloride in den Beton eindringen können müssen Sie in gelöster Form vorliegen. Aufgrund des Klimas an potenziellen Standorten des Kollektorfeldes kann davon ausgegangen werden, dass Chloride zum Beispiel mit Sandstürmen aus küstennahen Bereichen zu den Bauteilen transportiert werden. Dabei liegen Sie allerdings nicht in gelöster Form vor und können somit nicht in den Beton eindringen. Das grundsätzlich sehr trockene Klima vermeidet zudem, dass die wenigen dort befindlichen Chloride in Lösung gehen. Geht man also davon aus, dass das Chloridangebot äußerst gering, bzw. nicht vorhanden ist, setzt sich der Parameter  $C_{S,\Delta x}$  zu null und die Gleichung 1.1.1.12.2 ergibt keinen nennenswerten Chloridgehalt im Beton. Unabhängig von dem vorhandenen Chloridangebot weist der Beton wie in Kapitel 11 beschrieben einen um den Faktor 10 höheren Chlorideindringwiderstand auf als herkömmlicher Beton.

Durch das besonders Dichte Gefüge des Betons und zusätzlich vermutlich geringe Chlorideinwirkung am späteren Standort eines Kollektorfeldes ist mit keiner relevanten Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit durch Chloride zu rechnen.

# ConSol

## Concrete Solar Collector

### Bericht AP 1.1.2

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeico GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteile GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Definition der Basis-Kriterien .....	3
4. Erarbeitung eines praxistauglichen, robusten Vorbehandlungskonzepts .....	5

# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	05.10.2017	Timo Zippler	Definition der Basis-Kriterien
2	10.07.2018	Dirk Krüger	Einführung
3			
4			
5			
6			

**Tabelle 1-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 1.1.2

Die Arbeiten dieses Arbeitspaketes sollten vorwiegend durch eine Firma wahrgenommen werden, die bereits vor dem Projektbeginn aus dem Konsortium ausgeschieden ist. Einige Themen wurden aber dennoch von den Partnern bearbeitet mit Unterstützung durch die Firma Tesa.

Als Auswahlkriterium für die Verklebung des Spiegels wurden u.a. die Kräfte, die auf den Klebstoff einwirken bestimmt, sowie die wirtschaftlichen Anforderungen.

Mechanische und thermische Tests der Verbindung wurden im Rahmen der AP 1.1.1 und AP 1.3 untersucht. Es wurde ein Klebeband gefunden mit dem das Spiegelblech dauerhaft am Betonkollektor befestigt werden kann.

Es wurde ein geeigneter Kleber für den Verbund von Aluminiumsubstrat des Spiegels mit dem Betonkollektor gefunden.

## 3. Definition der Basis-Kriterien

Die folgenden technischen Merkmale sind für einen optimalen Klebstoff gefordert.

Art der Nutzung	Außenanwendung
Standorttypen	Wüsten, tropische Regionen, Küstenregionen (salzhaltige Luft), stark belastete Luft in Industrieanlagen
Arbeits- / Betriebstemperatur	- 40 °C / + 70 °C
Lager- / Transporttemperatur	- 40 °C / + 70 °C

Luftfeuchte	0 - 100 % relative Feuchte
Andere Merkmale	Hohe UV-beständig, wasserdicht , standhaft gegen salzhaltiger Luft
Klebkraft	Ergibt sich aus der Rückstellkraft des Refektormaterials (Input Almecco)
Scherfestigkeit	Ergibt sich aus der thermischen Ausdehnung des Substrats in Bezug auf den Reflektor (Input Stanecker und Almecco)
Verarbeitbarkeit	Der Klebstoff sollte in einem automatisierten Prozess appliziert werden können
Ausgleich von Oberflächenunregelmäßigkeiten	Der Kleber sollte Unregelmäßigkeiten (z.B. Poren im Beton) ausgleichen können
Lebensdauer	20 Jahre
Gewährleistung	2-3 Jahre
Weitere Randbedingungen	
Oberflächenbeschaffenheit Substrat/Reflektor	<p>Allg.: Klebeflächen müssen tragfähig, sauber, trocken, fett- und staubfrei sein</p> <p>→ in Bezug auf die Betonfertigung muss die Oberfläche frei von Schalen Öl sein</p> <p>→ Die Refektorklebefläche muss frei von Trennmittel sein (Lagerung)</p>
Wirtschaftlichkeit	Der Quadratmeterpreis sollte in keinem Fall 6€ überschreiten. Es wird ein Preis von $\leq 2\text{€/m}^2$ angestrebt

## Wirtschaftliche Anforderungen

Das Verklebungssystem hat einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten eines Solar Kollektors. Das System soll zum einen die vorher angesprochenen Eigenschaften der Verarbeitbarkeit und der Standhaftigkeit erfüllen, aber es muss dabei eine Kosteneffizienz erreichen, die es dem Betonkollektor ermöglicht Wettbewerbsfähig zu sein. Die folgenden Verklebesysteme, bzw. Befestigungseinheiten von Dickglasspiegeln sollen eine Preisindikation geben:

- Solarlite SL4600 (2011): Die vollflächige Verklebung des Dünnglasspiegels wurde mit einem doppelseitigen Klebeband von der Firma 3M umgesetzt. Der Quadratmeterpreis lag bei diesem Band bei ca. 3 – 4€.
- Solarlite SL4600+ (2012): Die vollflächige Verklebung des Dünnglasspiegels erfolgte mit einem doppelseitigen Klebeband der Firma Tesa. Der Quadratmeterpreis lag zwischen 5 – 6€.

- Zum weiteren Vergleich: Dickglashersteller bieten den gesamten Spiegel mit den angeklebten Keramikanschlusspunkten für einen Quadratmeterpreis von ca. 16€ einen Bestellumfang von mehreren 100.000 m<sup>2</sup> an.

#### **4. Erarbeitung eines praxistauglichen, robusten Vorbehandlungskonzepts**

Versuche zur Klebwirkung von Klebebändern auf Beton und Aluminium wurden im Rahmen des AP 1.1.1 Betontechnik im Kapitel „Betonversuche zur Ermittlung der Auswirkung verschiedener Schalöle auf die Klebwirkung“ durchgeführt. Dort wurde auch betrachtet, ob Vorbehandlungen nötig sind. Es hat sich herausgestellt, dass es ein geeignetes Klebeband gibt, für das keine Vorbehandlung auf der Seite des Aluminiums oder auf der Betonoberfläche nötig ist. Weitere Ergebnisse siehe o.g. Kapitel.

# ConSol

Concrete Solar Collector

## Bericht AP 1.2

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH



# Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Theoretische Untersuchungen/Optimierungen zur Bewehrungstechnik.....	4
4. Geometriefindung, Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte .....	4
4.1 Geometriefindung des Abrollhügels.....	4
4.2 Geometriefindung Sichel und oberer Verzahnung .....	8
5. Konzeptionierung und Herstellung von Prüfständen .....	12
6. Versuche zur Bewehrungstechnik .....	14
7. Versuche zur Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln.....	18
8. Pflichtenheft Einwirkungen und Erstellung Sicherheitskonzept .....	20
8.1 Einleitung .....	20
8.2 Kräfte, Momente und ihre Effekte .....	21
8.3 Beispiel für den Effekt abhängig von Windgeschwindigkeit auf den jährlichen Ertrag 22	
8.4 Design Kriterien.....	23
8.5 Inputs und Definitionen für die Verformungsanalyse .....	24
8.6 Andere Lasten.....	26
9. Definition der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an einen Antrieb .....	27
9.1 Hardware .....	28
9.2 Betriebsarten.....	29
9.3 Gewünschte technischen Merkmale.....	31
9.4 Schnittstellen-Software.....	32
9.5 Schnittstelle für Auslegung Antriebssystem .....	32
9.6 Handgerät für Kollektorinstallation (optional) .....	33
9.7 Wirtschaftliche Anforderungen .....	33
10. Objektplanung/Erstellung Unterlagen für Baugenehmigung .....	34
11. Verformungsberechnungen .....	34
12. Abschätzung des daraus resultierenden optischen Wirkungsgrads und Berechnung der ökonomischen Auswirkungen von Verformungen .....	34
13. Schal-, Bewehrungs- und Montagepläne .....	37
14. Entwicklung des elektrischen Antriebskonzepts und der Halterung und Montage .....	39
15. Entwicklung Verankerungskonzept und Lasteinleitung: Rechnerische Vordimensionierung und Versuche.....	39

# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	28.1.2016	Dirk Krüger	Pflichtenheft Einwirkungen
2	03.02.2016	Sebastian Penkert	Arbeitsziel, Dokumentenstruktur
3	04.03.2016	Christoph Prahl	Lastfälle
4	19.05.2016	Timo Zippler	Abschnitt 8
5	28.05.2018	Sebastian Penkert	Abschnitt 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14
6	06.06.2018	Sebastian Penkert	Abschnitt 14
7	26.06.2018	Sebastian Penkert	Abschnitt 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14
8	09.07.2018	Sebastian Penkert	Abschnitt 14
9	10.07.2018	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung

**Tabelle 1-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 1.2 .

Es wurden Angaben für das Lastenheft zu Einwirkungen von Kräften auf die Kollektorstruktur erarbeitet, die Eingang in die FEM Analyse zur Kollektorverformung fanden.

In Modellrechnungen hat sich gezeigt, dass eine Auslegung als einwandige Schale bei Kollektorreihen mit je 2x5 Modulen je Antrieb zu große Verformungen infolge der aufsummierten Torsionsbeanspruchungen aufweist. Daher wurde ein Modell entwickelt, welches aus 2 Modulen je Antrieb besteht, was ein dezentrales Antriebssystem für die Kollektoren erfordert und es wurden in einem iterativen Prozess an Genauigkeitsanforderungen des EuroTrough angepasst.

Als wesentliche Innovation wurde im ConSol Projekt das Konzept des „Abrollhügels“ eingesetzt. Der Abrollmechanismus mit Abrollsichel und Verzahnung wurde konstruiert und in Tests geprüft.

Ziel war es, eine Konstruktion der Konzentratorstruktur zu entwickeln und durch Genehmigungs- und Ausführungsplanung eine endgültige Ausführungsvariante des Großdemonstrators zu bestimmen.

### 3. Theoretische Untersuchungen/Optimierungen zur Bewehrungstechnik

Die Herstellung der Unterkonstruktion für den Bau des Großdemonstrators erfolgt zum einen mit dem hochfesten Nanodur®-Feinkornbeton und zum anderen mit einem normalfesten Beton C35/45, siehe Kapitel 4. Die verwendete Betonrezeptur des Nanodur®-Betons mit einer Korngruppe von 1/3 ist in Tabelle 1.2.3.1 aufgeführt. Für die Bauteile aus Normalbeton wird ein Größtkorn von  $d = 8,00$  mm verwendet.

Um die Festigkeitseigenschaften des Nanodur®-Betons ( $f_{ctm} = 15,00$  N/mm<sup>2</sup>) bestmöglich auszunutzen, soll auf eine möglichst geringe Bewehrungsmengen zurückgegriffen werden. Für die vorgesehenen Verzahnungen aus Beton ist überwiegend auf eine Mikrobewehrung zurückzugreifen. Diese lässt sich optimal entlang der Zahnradkrümmungen verlegen. Sie dient als Robustheitsbewehrung und soll die Spaltzugkräfte infolge der hohen Flächenpressungen aufnehmen können.

Aufgrund der erforderlichen Baugenehmigung und der damit notwendigen statischen Berechnung sind die üblichen baulichen Normen einzuhalten, welche zu einem höherem Bewehrungsgrad führen, als dieser in Forschungsprojekten möglich wäre.

**Tabelle 1.2.3.1**

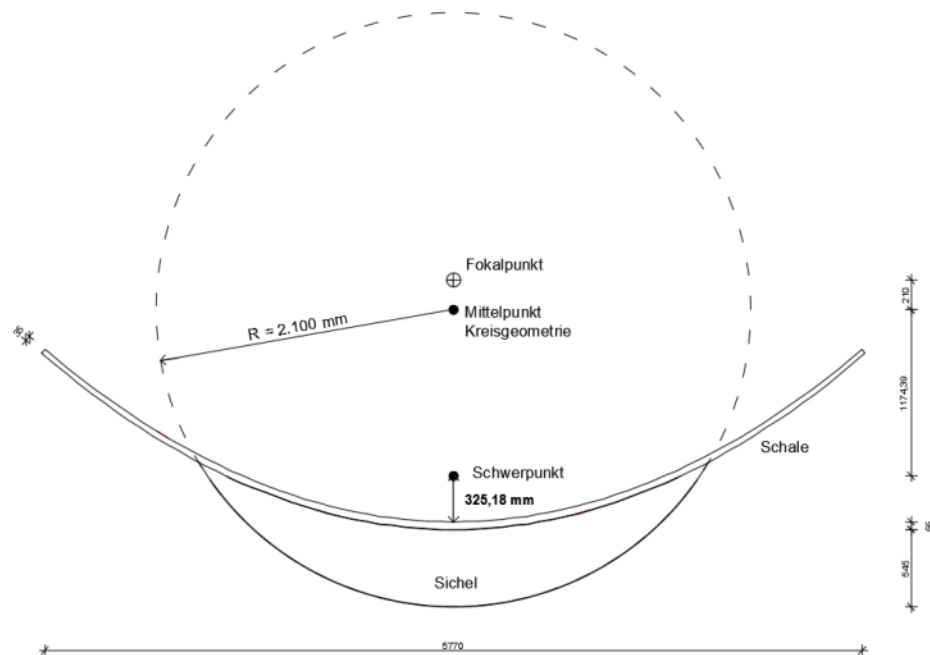
Ausgangsstoff	Zusammensetzung [kg/m <sup>3</sup> ]
Nanodur Compound 5941 grau	1.050,0
Basalt Fugensplitt 1/3 mm	880,0
Rheinsand 0/2 mm	430,0
Schwindreduzierer Eclipse® Floor	6,0
Fließmittel MasterGlenium ACE 430	14,0
Zugabewasser (ohne Fließmittel)	155,0

## 4. Geometriefindung, Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte

### 4.1 Geometriefindung des Abrollhügels

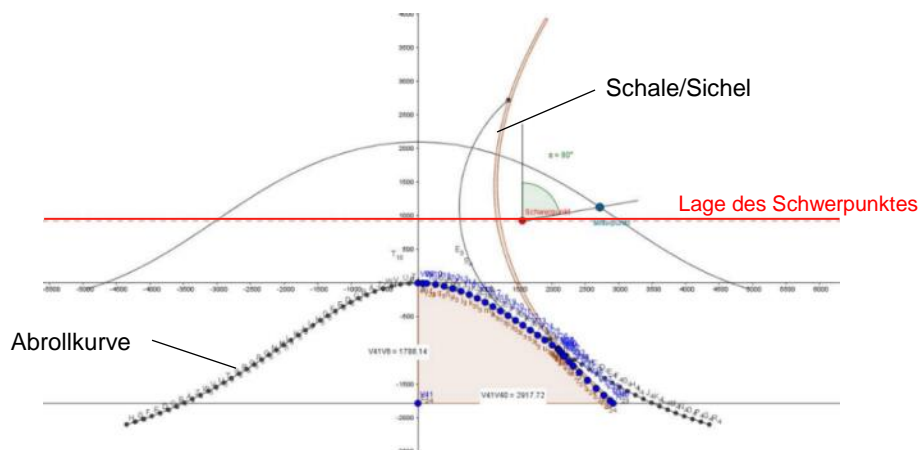
Besondere Bedeutung kommt der Geometriefindung des Abrollhügels zu. Entlang diesem können die Oberbauten (Sicheln und Schale) abrollen um eine optimalen Sonnennachführung zu gewährleisten. Er wurde so konzipiert, dass bei Änderung des Elevationswinkels keine vertikale Verschiebung des Schalenschwerpunktes auftritt. Somit verbleibt dieser auf einer horizontalen Achse, was zu einem reduzierten Energieaufwand des Antriebs bei der Sonnennachführung führt und eine vereinfachte Antriebsauslegung begünstigt. Wichtiger Parameter für die Geometriefindung ist die Lage des Schalenschwerpunktes, welcher von

der Ruhr-Universität Bochum ermittelt wurde. Bei einer Breite der Sichel von 15,00 cm weist dieser einen Abstand von 32,52 cm vom Parabelscheitel auf, siehe Abbildung 1.2.4.1.



**Abbildung 1.2.4.1**

Mit Hilfe der Lage des Schwerpunktes kann mittels einer numerischen Berechnung die exakte Abrollkurve des Abrollhügels ermittelt werden. Dabei wird bei der Sichel eine Kreisgeometrie zu Grunde gelegt, siehe Abbildung 1.2.4.1. Der Schwerpunkt ist hierbei ein Punkt P innerhalb des Kreisradius ( $R = 2.100,00 \text{ mm}$ ). Der Kreis muss nun entlang einer Kurve abrollen, welche einen horizontalen Verbleib des Punktes P gewährleistet. Diese gesuchte Kurve ist die Abrollkurve des Abrollhügels. Mittels Software (z. B. GeoGebra) kann diese Kurve visualisiert werden, siehe Abbildung 1.2.4.2.



**Abbildung 1.2.4.2**

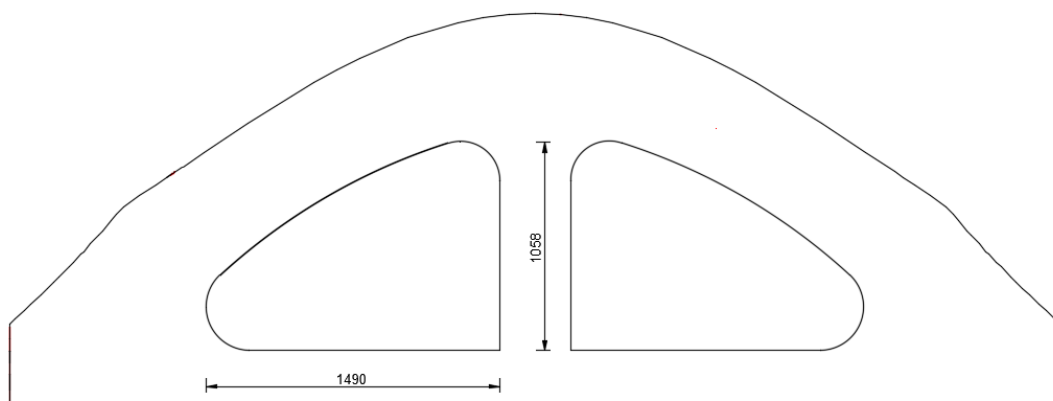
Die Abbildung 1.2.4.2 zeigt ebenfalls die Oberbauten bestehend aus Schale und Sichel in einer 80°-Position, welche die maximale Horizontalbewegung des Schwerpunktes darstellt. Eine weitere Drehung der Schale würde zum Verlust der Lagesicherheit der Schalenstruktur führen. Der sich nun einstellende notwendige Kurvenverlauf ist Abbildung 1.2.4.3 zu entnehmen. Hier ist ein Sicherheitsabstand von 40,00 cm zwischen Schalenendpunkt und

Oberkante Boden hinzugefügt worden. Dieser soll ein mögliches Einklemmen von Personen oder Tieren verhindern. Der vorliegende Querschnitt besitzt eine Breite von  $b = 5,34$  m bei einer Höhe von  $h = 1,99$  m sowie einer Tiefe  $t = 15,00$  cm. Die Masse  $m$  des Abrollhügels beträgt circa 2.890,00 kg.



**Abbildung 1.2.4.3**

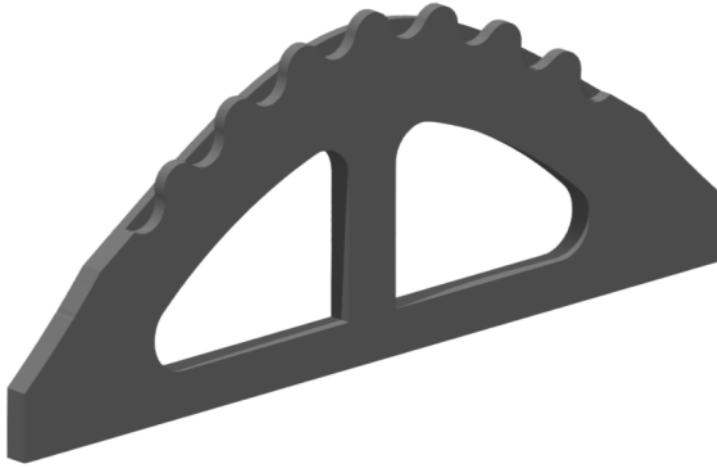
Um eine wirtschaftliche und möglichst kostenoptimierte Herstellungsweise zu garantieren sind zwei Aussparungen mit einer Breite  $b_A$  von jeweils 1,49 m und einer Höhe  $h_A$  von 1,06 m angebracht worden, siehe Abbildung 1.2.4.4. Dadurch verringert sich die Masse  $m_A$  des Bauteils um circa 31,00 % auf 1.995,00 kg.



**Abbildung 1.2.4.4**

Im nächsten Bearbeitungsschritt ist entlang der Abrollkurve eine Verzahnung angebracht worden. Sie dient als Führungsschiene für die Oberbauten während des Abrollvorgangs und soll die Schale vor einem Abrutschen in der 80°-Position bewahren. In einem ersten Entwurf wurde die 15,00 cm breite Lauffläche in eine 7,50 cm breite Verzahnung und eine 7,50 cm breite Lauffläche unterteilt, siehe Abbildung 1.2.4.5 und Abbildung 1.2.4.6. Diese Vorgehensweise konnte aber aufgrund der hohen Flächenpressung infolge der Oberbauten nicht realisiert werden, siehe Arbeitspaket 2, Abschnitt 3 Festlegung der Unterbauten.

Die statische Berechnung (siehe Arbeitspaket 2, Abschnitt 3) ergab eine Laufflächenbreite von 15,00 cm sowie eine Zahnradbreite von 8,00 cm. Aus Gründen der Materialoptimierung ist eine Abrollhügelverbreiterung auf beispielsweise 23,00 cm unwirtschaftlich. Somit wurde lediglich die Verzahnung seitlich an die Lauffläche verschoben.

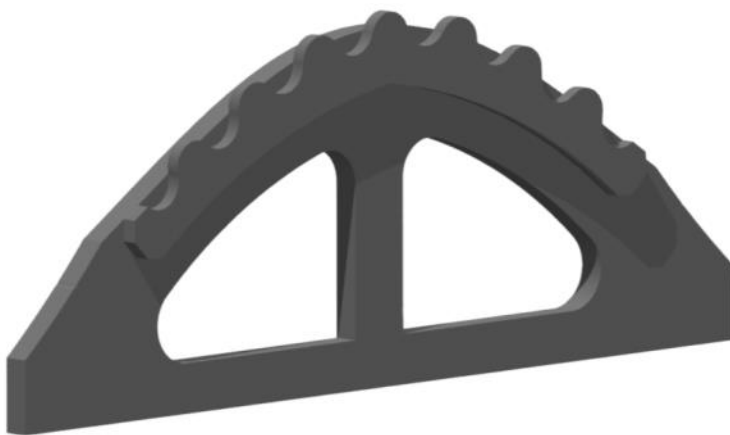


**Abbildung 1.2.4.5**

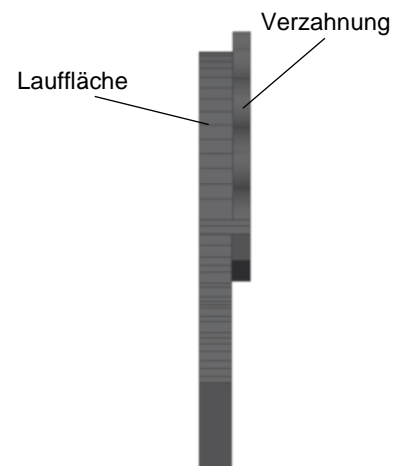


**Abbildung 1.2.4.6**

Auf der Abbildung 1.2.4.7 sowie Abbildung 1.2.4.8 ist die exzentrische Anordnung der Verzahnung zu erkennen. Die Laufflächenbreite beträgt 15,00 cm, die Zahnradbreite weist eine Breite von 8,00 cm auf.



**Abbildung 1.2.4.7**



**Abbildung 1.2.4.8**

Das Volumen des Abrollhügels ohne seitliche Verzahnung beläuft sich auf circa 0,80 m<sup>3</sup>. Ein solches Bauteil vollständig aus Nanodur®-Feinkornbeton herzustellen ist aufgrund der hohen Materialkosten des Betons äußerst unwirtschaftlich.

Die Hauptlasten infolge der Oberbauten werden entlang der Abrollkurve (Lauffläche) zu den Auflagern abgetragen. Somit wird lediglich dieser Bereich mittels Nanodur®-Feinkornbeton hergestellt. Der restliche, weniger stark belastete Querschnitt wird aus einem C35/45 gefertigt. Ebenso erfolgt die Herstellung der seitlichen Verzahnung aus einem Nanodur®-Beton. Die hier auftretenden Zugspannungen sowie Abriebs- und Reibungskräfte erfordern einen hochfesten Beton.

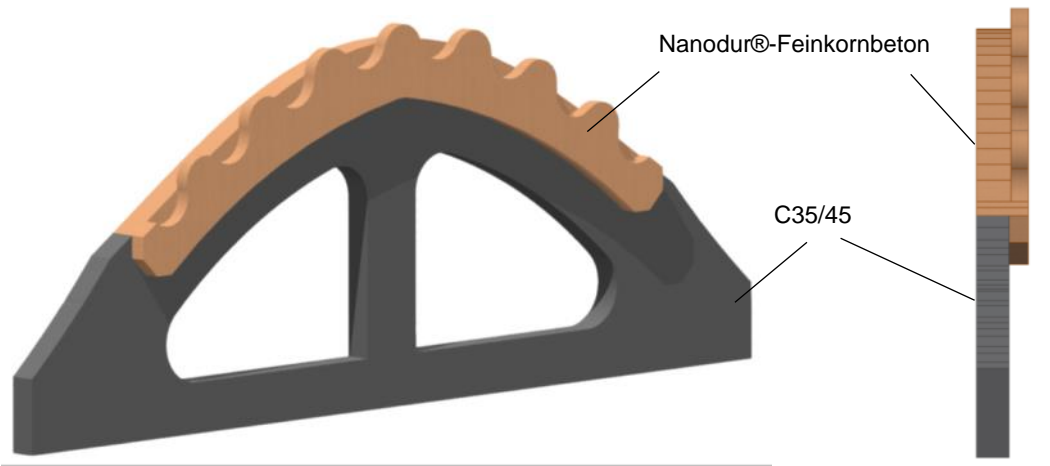


Abbildung 1.2.4.9

Abbildung 1.2.4.10

Ziel ist es die Vertikallasten vollständig über die Lauffläche des Abrollhügels aufzunehmen und zu den Fundamenten weiterzuleiten. Die Verzahnung der Oberbauten liegt somit nicht auf dem Gegenstück der Unterbauten auf. Hier ist eine Fuge/Spiel von mindestens 6,00 mm vorgesehen, siehe Abbildung 1.2.4.11. Die Verzahnungen berühren sich lediglich in ihren jeweiligen Flanken, infolge des Suntrackings.

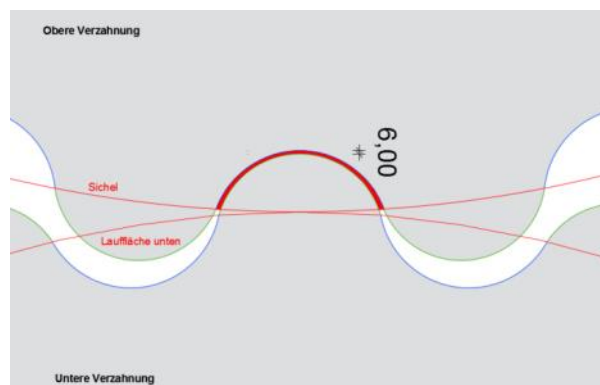


Abbildung 1.2.4.11

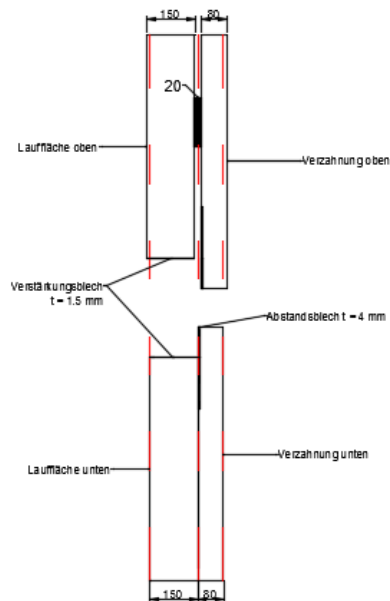
## 4.2 Geometriefindung Sichel und oberer Verzahnung

Um eine Sonnennachverfolgung der Schale entlang der Abrollhügel zu ermöglichen, muss die Schale entsprechend modifiziert werden. Würde sich die Schale direkt entlang der Abrollkurve bewegen, käme es zum sofortigen Bauteilversagen infolge von Spannungsspitzen in der Schale. Die Modifikation muss in der Lage sein, die Steifigkeit der Schale zu erhöhen und ein schadenfreies Abrollen zu ermöglichen. Hierfür wurde eine sogenannte Sichel entwickelt, siehe Abbildung 1.2.4.12. Pro Schale werden zwei solcher 15,00 cm breiter Sichel montiert. Die Montage erfolgt über Gewindestangen. Dazu sind jeweils zwei Hüllrohre pro Sichel vorgesehen über die dann die Verschraubung mit der Sichel erfolgt. In der Sichel sind dazu spezielle Bauteile eingelassen, welche Orbiter genannt werden, siehe Arbeitspaket 2, Abschnitt 5: Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung.



**Abbildung 1.2.4.12**

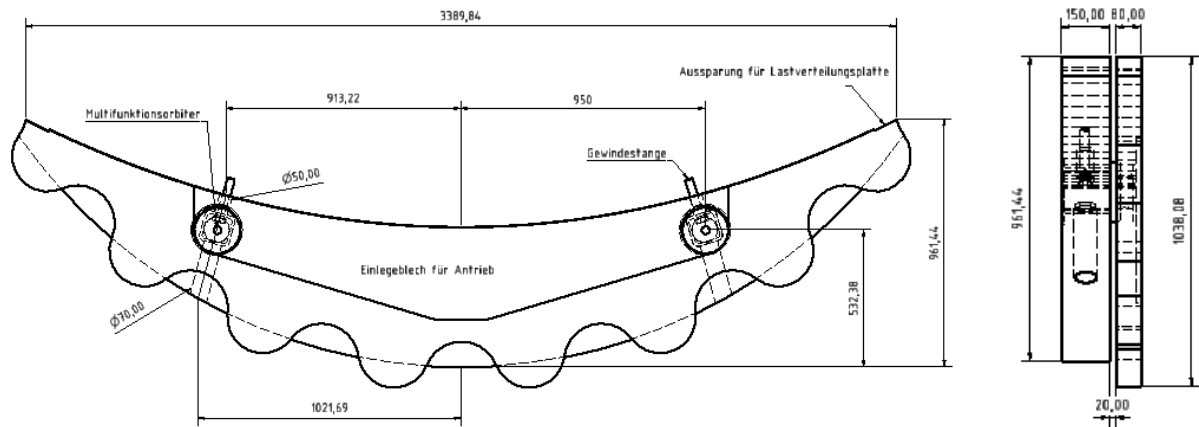
Die Sichel wird seitlich durch eine 8,00 cm breite Verzahnung erweitert. Somit können die Oberbauten entlang der Unterbauten abrollen ohne wegzurutschen. Dabei wird die Verzahnung in einem Abstand von 2,00 cm seitlich zur Sichel montiert. Dieses Spiel ist notwendig, damit die obere Verzahnung nicht gegen die untere Lauffläche stößt und die untere Verzahnung nicht mit der Sichel kollidiert, siehe Abbildung 1.2.4.13.



**Abbildung 1.2.4.13**

Die Abmessungen der Baugruppe aus Sichel und oberer Verzahnung können 1.2.4.14 entnommen werden. Das Bauteil besitzt eine Länge von circa 3,40 m. Die Sichel ist mit jeweils zwei verschiedenen Hüllrohren (Durchmesser  $\varnothing=70$  mm und Durchmesser  $\varnothing=50$  mm) versehen. Diese werden durch zwei sogenannte Multifunktionsorbiter miteinander verbunden.



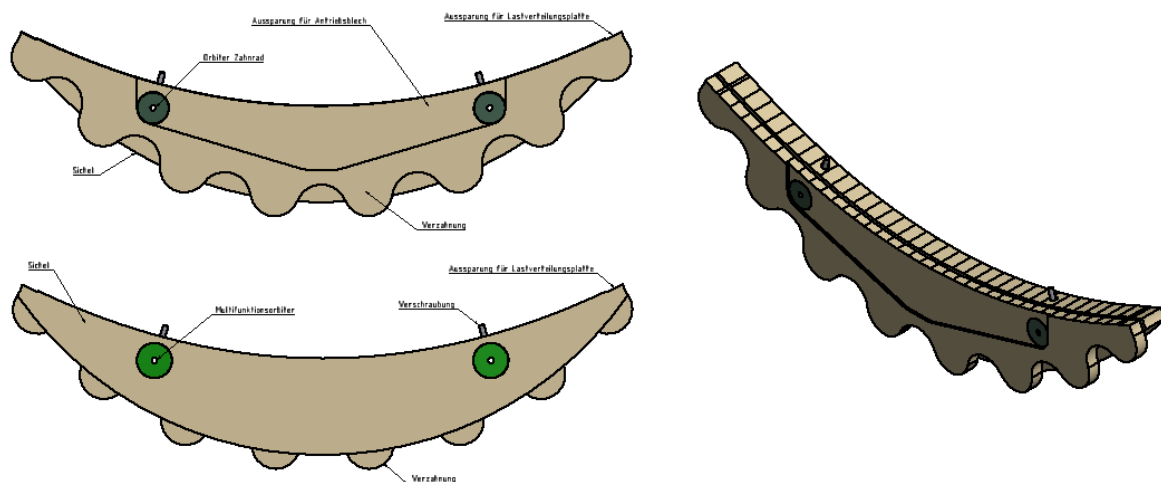


**Abbildung 1.2.4.14**

Jeweils zwei dieser Multifunktionsorbiter befinden sich in der Sichel und erlauben sowohl eine Verschraubung mit der Verzahnung als auch mit der Schale. In der oberen Verzahnung befinden sich ebenfalls zwei kleinere Orbiter. Hierüber erfolgt allerdings keine Verschraubung mit der Schale, sondern nur mit der Sichel. In Abbildung 1.2.4.15 ist die Baugruppe samt Verschraubung noch einmal genauer dargestellt.

Ebenfalls zu erkennen ist eine Aussparung ( $t = 15 \text{ mm}$ ) für das Antriebsblech. Dieses kann später mit den Orbiter des Zahnrades verschraubt werden. Es ist der Verbindungspunkt zwischen Antrieb und Rinne. Die Aussparung reicht von Orbiter zu Orbiter, hieran kann das Blech später verschraubt werden.

An den jeweiligen Enden der Sichel bzw. der Verzahnung sind 1,50 cm tiefe und 10,00 cm lange Aussparungen angebracht ( $b = 15,00 \text{ cm}$ ). An diesen wird eine Lastverteilungsplatte (30,00 x 20,00 x 1,00 cm) aus Edelstahl mittels Verklebung (SX481E) angebracht. Diese soll die Spannungsspitzen aus der Schale abbauen, siehe Abbildung 1.2.4.16.



**Abbildung 1.2.4.15**

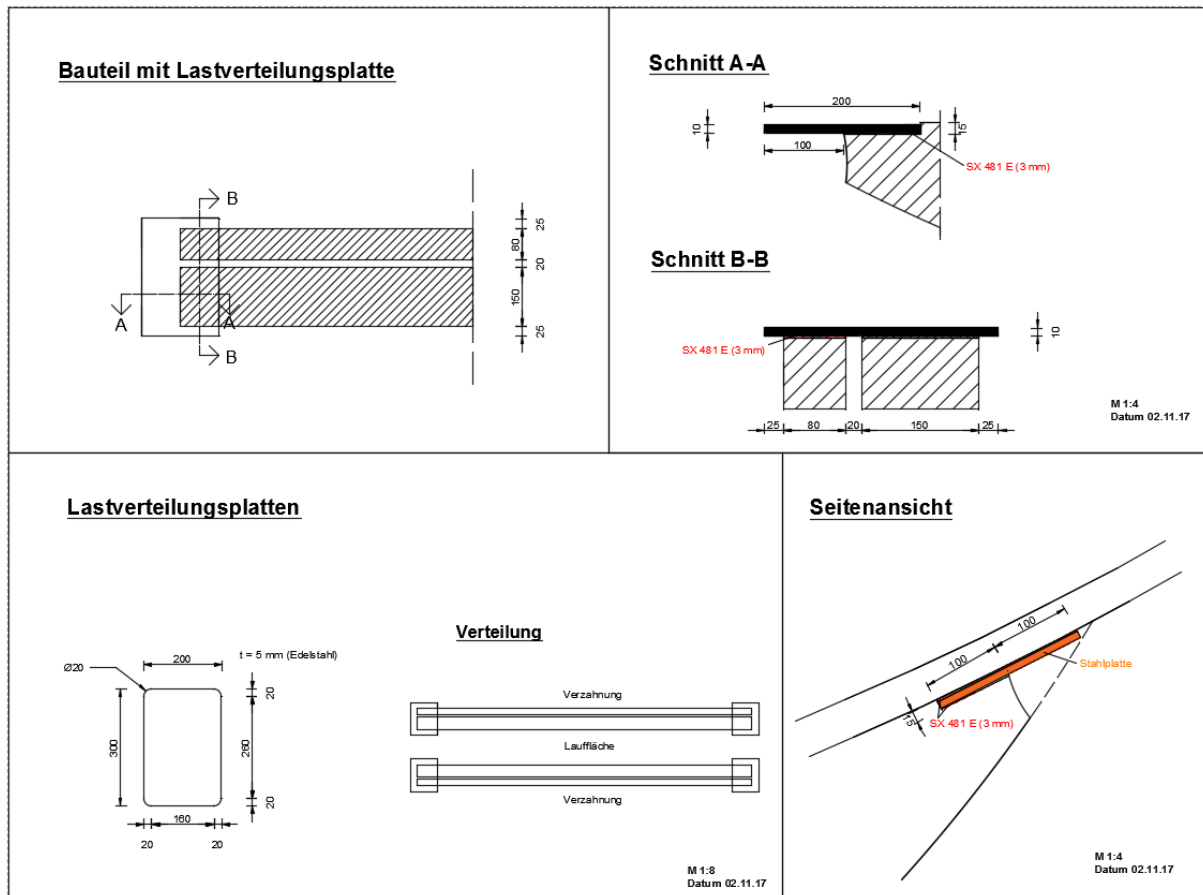


Abbildung 1.2.4.16

## 5. Konzeptionierung und Herstellung von Prüfständen

Im Laufe der Planungs- und Entwicklungsphase ist die Verwendung von Betonverzahnungen für den Bau des Großdemonstrators beschlossen worden, diese sollen die bislang erprobten Edelstahlverzahnungen aus dem Schwerpunktprogramm „Leicht Bauen mit Beton“ (SPP 1542) kostensparend ersetzen. In Abbildung 1.2.5.1 ist der bereits an der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelte und gebaute Prototyp abgebildet. Hier sind die bislang benutzten Edelstahlverzahnungen an den Unter- und Oberbauten zu erkennen.

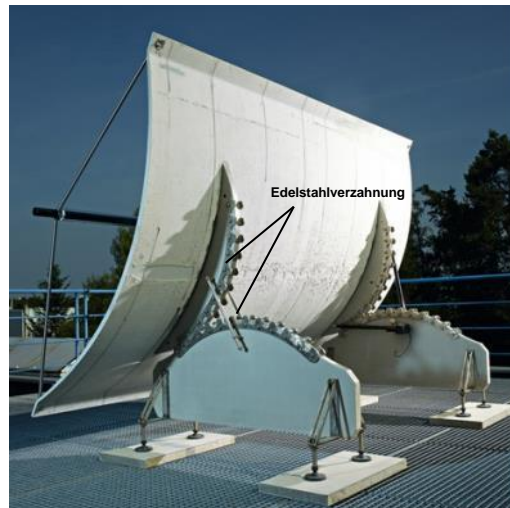


Abbildung 1.2.5.1

Zur Erprobung der Anwendbarkeit von Betonverzahnungen ist ein Testzahnrad aus Nano-dur®-Feinkornbeton hergestellt worden. Die Abmessungen lassen sich Abbildung 1.2.5.2 entnehmen. Die Breite der beiden Verzahnungen beträgt jeweils 18,00 cm bei einer Länge von circa 92,00 cm.

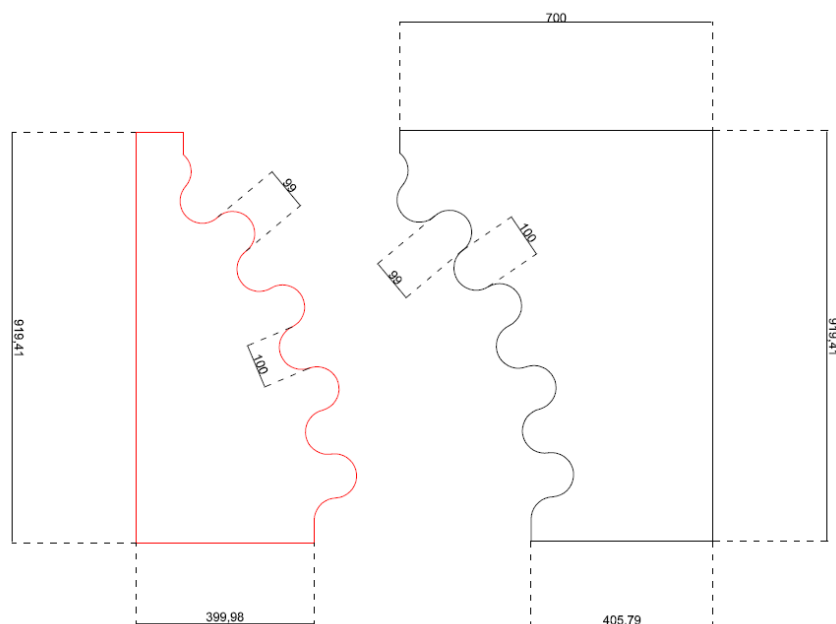


Abbildung 1.2.5.2

Anhand von Abbildung 1.2.5.2 ist mittels 3D-Heizdraht eine Schalung aus Styrodur geschnitten worden. Diese Styrodurschalung ist in eine rechteckige Holzschalung eingesetzt und entsprechend konstruktiv bewehrt worden, siehe Abbildung 1.2.5.3. Die angebrachten Gewichte auf dem Styrodurelement wirken den Auftriebskräften des Betons entgegen.



**Abbildung 1.2.5.3**

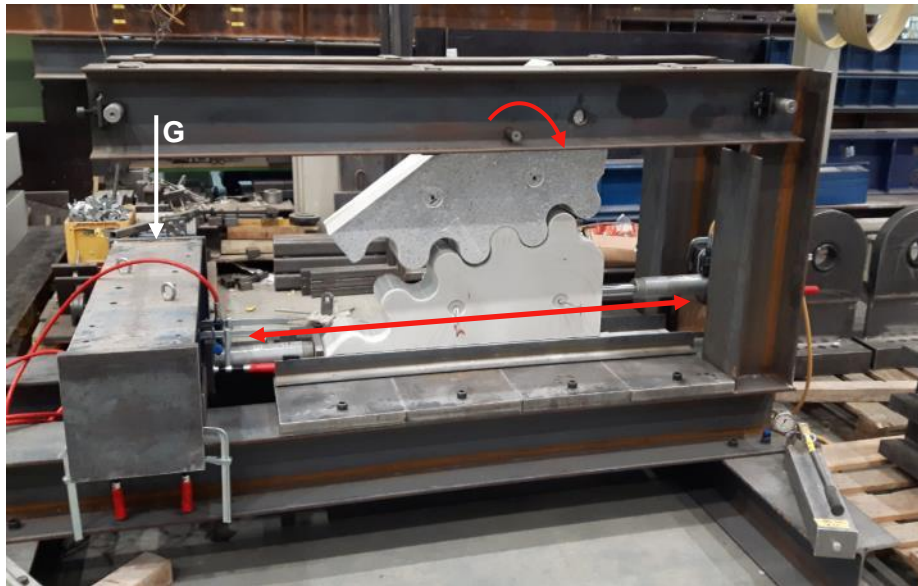
Beispielhaft ist in Abbildung 1.2.5.4 der fertig betonierte untere Teil des Testsegmentes abgebildet. Seitlich sind dort noch zwei Transportanker zu erkennen, um das circa 130,00 kg schwere Bauteil anzuheben.



**Abbildung 1.2.5.4**

Der obere und untere Teil der Verzahnung sind in einen extra angefertigten Stahlrahmen eingebracht worden. Der untere Teil befindet sich auf einer Teflonschicht um die Reibungskräfte möglichst gering zu halten. Die Verzahnung kann sich hier bedingt zweier Zylinder horizontal frei bewegen.

Der obere Teil der Verzahnung ist drehbar an den oberen Doppel-T-Trägern montiert. Bewegt sich nun der untere Teil der Verzahnung aufgrund der Hydraulikpressen auf einer horizontalen Strecke, so rollt das obere drehbar gelagerte Verzahnungssegment entlang des unteren Zahnradsegmentes ab. Das System kann zusätzlich noch mit einer Vertikallast  $G$  beanschlagt werden. Somit kann die Auflast auf das System erhöht werden was sowohl zur einer erhöhten Beanspruchung auf die Verzahnungen sowie einer Zunahme der Reibung zwischen den Zahnflanken führt, siehe Abbildung 1.2.5.5.



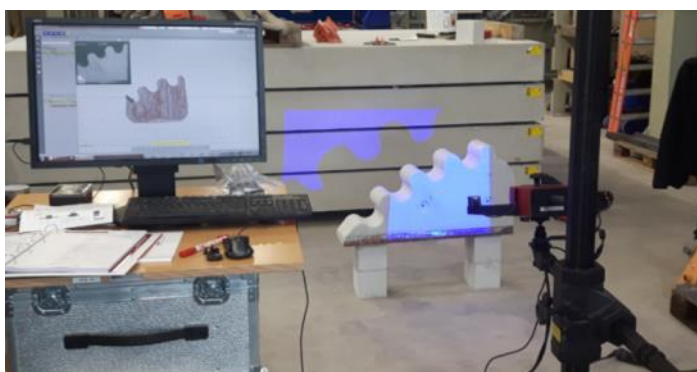
**Abbildung 1.2.5.5**

Somit konnte gezeigt werden, dass Zahnräder aus Beton prinzipiell herstellbar sind. Der Prüfstand ermöglichte ein einwandfreies Abrollen des oberen Segmentes entlang der unteren Verzahnung. Somit ist eine direkte Verwendung für den Bau der Parabolrinne möglich.

## 6. Versuche zur Bewehrungstechnik

Um den Abrieb und die Schädigungen der Zahnflanken messen zu können, wurde ein Soll-Ist-Vergleich mittels des ATOS Compact Scan 5M durchgeführt (siehe Abbildung 1.2.6.1; rechts). Die Untersuchung sollte detailliertere Erkenntnisse über die Verwendung von Betonverzahnungen für den Demonstrator hervorbringen.

Hierzu wurden die beiden Zahnradsegmente mit Markierungspunkten versehen, welche von der Software erkannt und digitalisiert werden. Nach der Betonage wurden das obere und das untere Verzahnungssegment eingescannt.

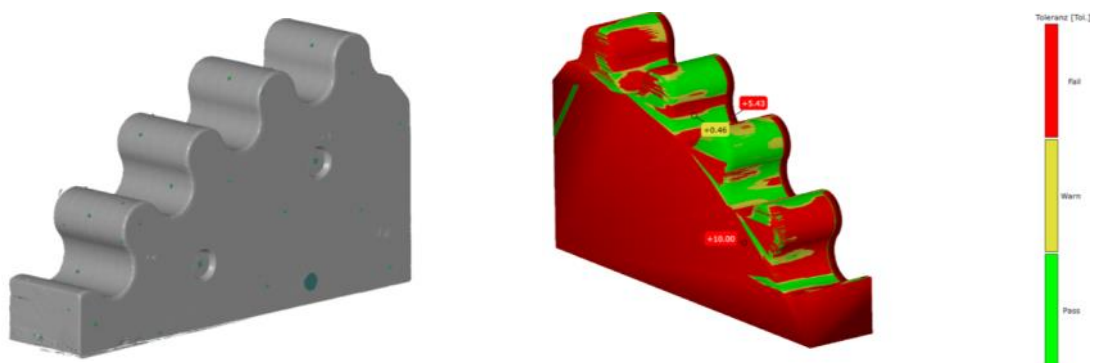


**Abbildung 1.2.6.1**

Abbildung 1.2.6.2 zeigt sowohl das direkt nach der Herstellung eingescannte Zahnradsegment (links) als auch den Soll-Ist-Vergleich (rechts) mit der Idealgeometrie. So lassen sich kleinste Abweichungen, Abrieb und Oberflächenrisse direkt erkennen und ausmessen. Der Vergleich zeigte eine maximale Abweichung der Ist-Geometrie von der Soll-

Geometrie von 5,43 mm. Diese Abweichung ergibt sich aus dem Herstellungsprozess. Das Stryodurelement ist mit einer 3 mm starken Folie verklebt worden, welche ein leichteres und schadensfreie Ausschalen ermöglichen sollte. Diese Folie hat sich aufgrund der Hydratationswärme allerdings deformiert und die geringen punktuellen Abweichungen verursacht.

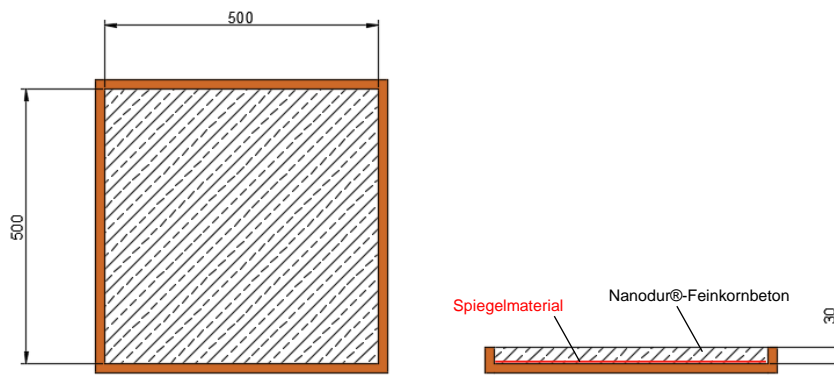
Bei der Sonnennachverfolgung werden nur sehr langsame Geschwindigkeiten von 10° bis 15°/h erreicht. Somit ist die Langzeitbelastung für die Beständigkeit der Verzahnung äußerst relevant. Die Rinne vollzieht in 15 Jahren etwa 11.000 Abrollvorgänge. Diese Belastungssituation ist in der Kürze der Projektlaufzeit nicht darstellbar gewesen. Hierzu sind aber weitere Untersuchungen an der Technischen Universität geplant. Somit konnten nur Belastungen aus sehr kurzen Belastungszeiten realisiert werden.



**Abbildung 1.2.6.2**

Die Untersuchung hat allerdings gezeigt, dass auch kleinste Abriebs- und Verschleißdeformationen punktuell nachweisbar sind. Die Messtechnik erlaubt hier Messgenauigkeiten von ca. 20 µm/m. Die Messungen haben insgesamt gezeigt, dass eine prinzipielle Anwendung von Zahnrädern aus Beton für den Bau des Demonstrators umsetzbar sind.

In einem weiteren Versuch sollte untersucht werden, ob die Bewehrungsmenge der Schale zu reduzieren ist, indem diese durch das Spiegelmateriale ersetzt wird. Dazu wurden sechs Platten aus Nanodur®-Feinkornbeton mit den Abmessungen 50,00 x 50,00 x 3,00 cm hergestellt, siehe Abbildung 1.2.3.3. Vorher wurde für jeden der sechs Probekörper das entsprechende Material aus Tabelle 1.2.6.1 in die Schalung eingelegt und direkt darauf betoniert. Hiermit sollte in einem ersten Schritt untersucht werden, ob der Beton einen festen Verbund mit dem Spiegelmateriale eingeht.



**Abbildung 1.2.3.3**

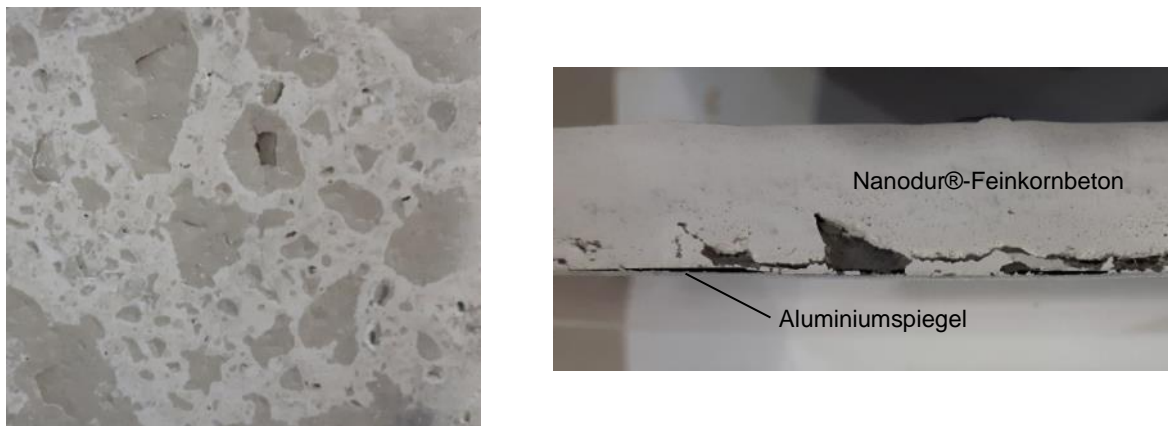


Bei denen in Tabelle 1.2.6.1 aufgeführten Spiegelmaterialien handelt es sich um speziell beschichtete Aluminiumspiegel der Firma ALMECO. Hierfür wurden uns Stärken von 0,30 mm, 0,50 mm und 0,70 mm zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurde ein Dünnglasspiegel des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt untersucht.

**Tabelle 1.2.6.1**

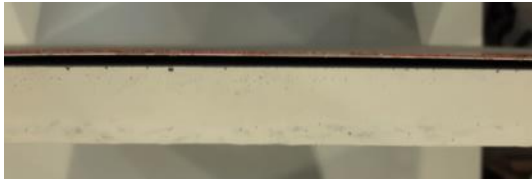
Typ	Anzahl
Dünnglasspiegel DLR	1
ALMECO - Vega energy Standard 0.3 mm	1
ALMECO - Vega energy Standard 0.5 mm	1
ALMECO - Vega energy Standard 0.7mm	1
ALMCO - Vega energy offene Poren Parameter 1 - 0.7 mm	1
ALMCO - Vega energy offene Poren Parameter 2 - 0.7 mm	1

Einen Tag nach der Betonage erfolgte das Ausschalen der einzelnen Probekörper. Bei allen fünf Aluminiumspiegel ist der selbe charakteristische Effekt aufgetreten, das Aluminium der Spiegel hat mit dem Beton reagiert und das Ablösen des Spiegels bewirkt, siehe Abbildung 1.2.6.4.



**Abbildung 1.2.6.4**

Der Dünnglasspiegel des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt reagierten nicht mit dem Beton. Hier wäre zu vermuten gewesen, dass es zu einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kommen könnte, da Glas hauptsächlich aus Siliciumdioxid besteht und dieses mit den Alkali- und Hydroxid-Ionen des Betons reagiert. Die Bilder nach Ausschalung sind aber ebenfalls eindeutig, siehe Abbildung 1.2.6.5. Das Spiegelmateriale ist keinen flächendeckenden Verbund mit dem Beton eingegangen auch wenn dies nicht so gravierend war, wie bei den Aluminiumspiegeln. Die Glasspiegel haben sich teilweise mit dem Beton fest verbunden (siehe Abbildung 1.2.6.5, rechts). Wie das Bild aus Abbildung 1.2.6.5, links aber verdeutlicht ist dies nicht für den gesamten Querschnitt der Fall.



**Abbildung 1.2.6.5**

Somit lässt sich festhalten, dass die Aluminiumspiegel der Firma ALMECO nicht als Bewehrungsalternative in Frage kommen und wir auf konventionelle Bewehrung zurückgreifen müssen, welche aufgrund der erforderlichen statischen Berechnungen ebenfalls unvermeidlich ist.



## 7. Versuche zur Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln

Vor dem eigentlichen Bau des Großdemonstrators ist ein kleines Probeelement hergestellt worden. Hiermit sollten folgende Aspekte untersucht werden:

- Generelle Machbarkeit der Schalenherstellung
- Generelle Machbarkeit der Sichelherstellung
- Untersuchung der Verbindungsmittel zwischen Schale und Hüllrohr
- Untersuchung der Verschiedenen Orbiter – Einbauteile
- Entscheidungsfindung zwischen NANODUR compound 5941 grau oder weiß

In Abbildung 1.2.7.1 sind die genauen Abmessungen des Elementes angegeben. Die Öffnungsweite orientiert sich dabei mit 5,77 m an der späteren Öffnungsweite des Großdemonstrators, welche an den EuroTrough angelehnt ist. Die Schalenbreite von 1,50 m ist aufgrund der lieferbaren Spiegelabmessungen des Projektpartners Almeco gewählt worden.

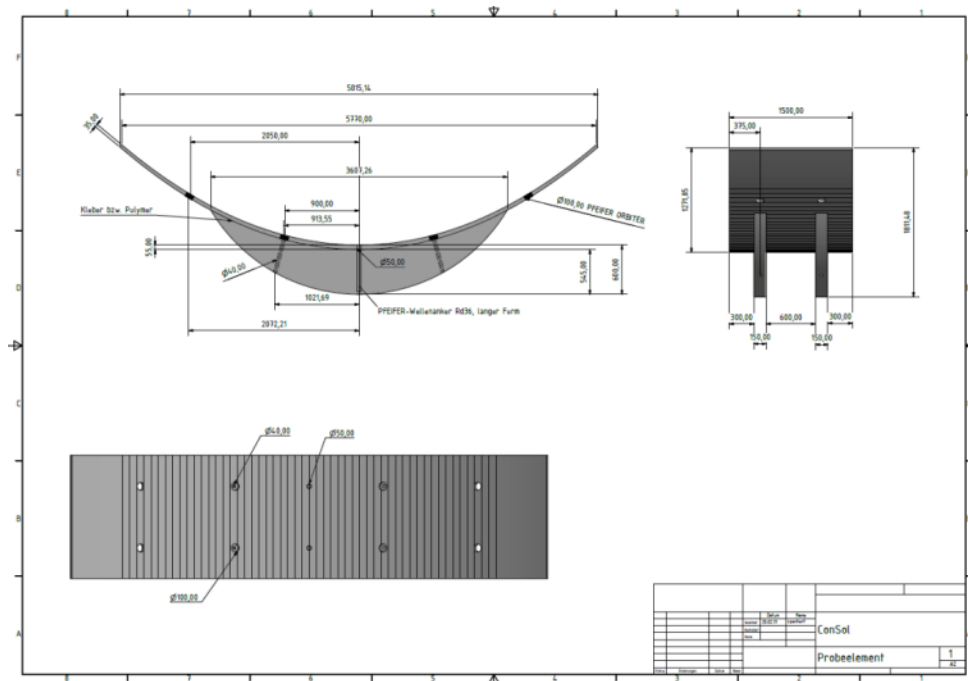


Abbildung 1.2.7.1

Die Skizze zeigt in der Schale acht Aussparungen mit einem Außendurchmesser von  $\varnothing = 100,00$  mm. Hier befinden sich im Endzustand die acht Orbiter der Firma PFEIFER. An vier dieser Orbiter findet die Verschraubung mit der Sichel statt. Die zwei äußeren Orbiter pro Schalenseite dienen dem späteren Wendevorgang der Schale, da diese kopfüber hergestellt wird. Die  $\varnothing = 50,00$  mm großen Öffnungen auf der Symmetrieachse symbolisieren zwei Rd 36 Transportanker an denen das Probeelement später bewegt werden kann.

Die gesamte Schale lagert auf zwei Sichel, welche an der Technischen Universität Kaiserslautern hergestellt wurden. Der spätere Großdemonstrator weist hier ebenfalls zwei Sichel pro Schale auf. Diese sind mit jeweils zwei Hüllrohren  $\varnothing = 40,00$  mm versehen. Durch diese werden später zwei Gewindestangen geschoben und mit den entsprechenden Orbitern in der Schale verschraubt. Anschließend wird das Hüllrohr mit Beton vergossen, sodass ein fester Verbund zwischen Sichel und Gewindestangen hergestellt werden kann. Die Befestigung des Hüllrohrs in der Schalung ist in Abbildung 1.2.7.2 dargestellt. Die vollständige Schalung

besteht aus Styrodurelementen (siehe Abbildung 1.2.7.3), welche mittels 3D Heißdraht entsprechend zugeschnitten wurden. Hier wurden zwei 8,00 mm starke Lagen verwendet, welche übereinandergelegt worden sind. 13,00 kg schweren Futterplatten drückten die beiden Lagen während der Betonage fest zusammen, sodass kein Beton dazwischen laufen konnte.



**Abbildung 1.2.7.2**



**Abbildung 1.2.7.3**

Für die beiden Sicheln wurden einmal NANODUR compound 5941 weiß sowie NANODUR compound 5941 grau verwendet, siehe Abbildung 1.2.7.4. Beide Varianten werden von der Firma Dyckerhoff angeboten, die Variante grau weist in etwa 10% bessere Festigkeitseigenschaften auf und benötigt eine geringere Wassermenge.



**Abbildung 1.2.7.4**

Nach beiden Betonagen der Sicheln fiel die Wahl für den Großdemonstrator auf den Compound 5941 grau, da dieser nicht nur die besseren Festigkeitseigenschaften besitzt, sondern auch eine bessere Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit aufwies. Beide Bauteile gelangten per Spedition zum Projektpartner STANECKER, wo sie mit, der dort hergestellten Schale, verbunden wurde. Abbildung 1.2.7.5 zeigt das fertige Testelement ohne Verspiegelung. Die Schale wurde erfolgreich mittels Gewindestangen mit den Sicheln verschraubt. Die erfolgreiche Herstellung des Probeelements konnte somit eine Verschraubung mittels Hüllrohren und Orbitern bestätigen. Der beiden unterschiedlichen Produktionsstandorte (Technische Universität Kaiserslautern und Stanecker Betonfertigteilewerk GmbH) haben nicht zu Passungenauigkeiten zwischen den Einbauteilen geführt.



Abbildung 1.2.7.5

## 8. Pflichtenheft Einwirkungen und Erstellung Sicherheitskonzept

### 8.1 Einleitung

Im Kapitel Pflichtenheft Einwirkungen werden die Einflüsse von Kräften auf die Kollektorstruktur beschrieben und soweit möglich quantifiziert. Die hier aufgeführten Ergebnisse gehen in die Verformungsberechnungen ein. Daher ist eine Abstimmung mit den Anforderungen der Verformungsberechnungen notwendig.

Zum besseren Verständnis werden in Kapitel 7.2 zunächst die an einem Parabolrinnenkollektor auftretenden Kräfte erläutert.

Ein Parabolrinnenkollektor besteht zum großen Teil aus einer beweglichen Struktur, die die wesentlichen Komponenten in Position bringt: Spiegeloberfläche und Receiver.

Plastische Deformationen aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten können das Solarfeld beschädigen. Offensichtlich muss der Kollektor hohe Windgeschwindigkeiten überleben.

Während des Betriebes treten elastische Deformationen auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auf und beeinflussen somit die optische Effizienz, durch Verschieben des Spiegels aus der korrekten Position. Zusätzliche Lasten entstehen durch die Reibung von Kugellagern, Drehdurchführungen und durch Ungleichgewicht der Kollektoren.

Während die Stellen, wo die Kräfte angreifen bei der Lagerung und flexiblen Verbindungen eindeutig festgelegt werden können, ist dies für die Windkräfte nicht bekannt. Windgeschwindigkeit variiert zwischen den Reihen. In der ersten Reihe ist die Windgeschwindigkeit am höchsten, während sie in den dahinter liegenden Reihen weniger wird. Entlang der Kollektorhöhe variieren die Windkräfte auch. An seiner Oberseite sind sie höher als im unteren Bereich und können an der Unterkante wieder höher werden. Auch der Winkel, in welchem der Wind in das Feld trifft beeinflusst die Windlasten auf den Kollektor. Berechnung solcher Effekte mit Computational Fluid Dynamics (CFD) sind uns noch nicht bekannt. Statt dessen wurden Windkanaltests durchgeführt. Die weiteren Berechnungen, insbesondere die Koeffizienten für Kräfte und Momente sind aus „Wind Tunnel Tests of Parabolic Trough Solar Collectors, March 2001–August 2003, N. Hosoya and J.A. Peterka, R.C. Gee, D. Kearney, Subcontract Report, NREL/SR-550-32282, May 2008“ abgeleitet.

Die Kräfte, die Kräfte auf den Kollektor führen zu einer Verformung des Kollektors. Für die Beurteilung, inwieweit die reflektierte Strahlung den Absorber trifft ist es hilfreich, die Winkelabweichung des Spiegels zu kennen.

Ein Solarkollektorfeld besteht aus mehreren Kollektoren. Ein Kollektor wird SCA = “solar collector assembly” genannt. Ein SCA besteht aus mehreren SCE = solar collector element, welches die Struktur zwischen zwei Pylonen ist, oftmals mit einer Länge von 12m )Abbildung 1.2.8.1).

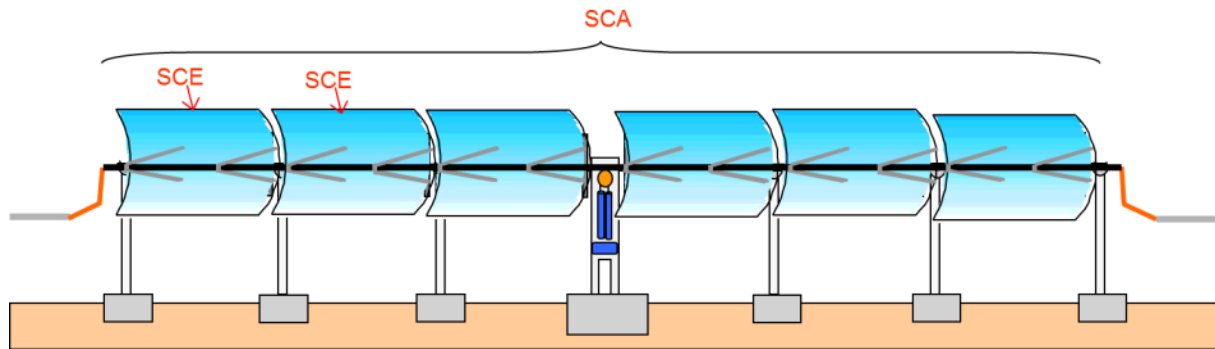


Abbildung 1.2.8.1: Einteilung nach SCA, SCE

Typischerweise bewegt ein Antrieb in der Mitte des SCA alle SCE.

## 8.2 Kräfte, Momente und ihre Effekte

Die Torsionskräfte addieren sich von SCE zu SCE, so dass die maximale Kraft an den SCE neben dem Antrieb angreift. Während des SCE neben dem Antrieb relativ korrekt positioniert ist, ist der SCE am Ende am stärksten verdreht (Abbildung 1.2.8.1).

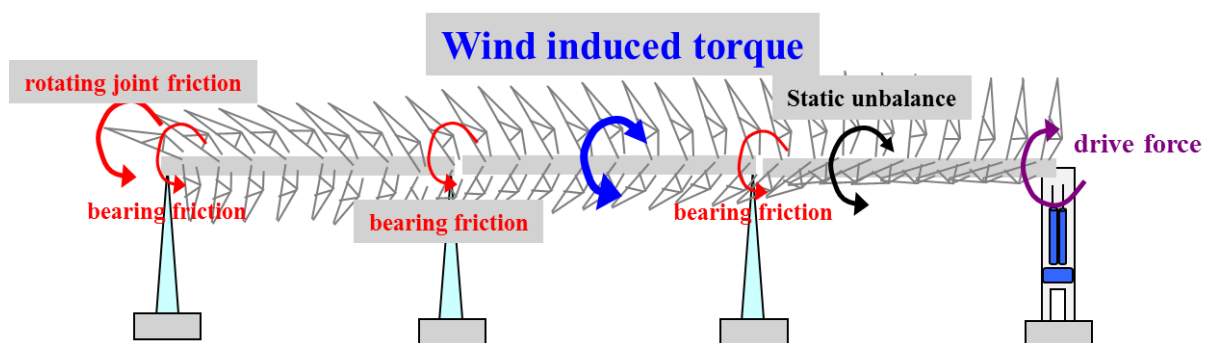


Abbildung 1.2.8.2: Kräfte an einem Parabolrinnenkollektor

Innerhalb eines SCE tritt laterale Verformung auf. Die Kräfte addieren sich von der Kante zur Mitte.

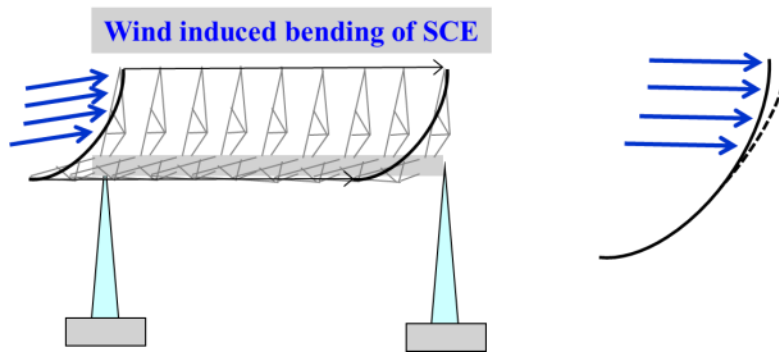


Abbildung 1.2.8.3: Windkräfte

Torsionskräfte werden durch eine „Torsion Box“ oder Torsionsrohr von einem SCE zum nächsten übergeben. Torsionskräfte spielen keine wichtige Rolle für das Layout der Struktur unmittelbar hinter dem Spiegel. Die Struktur direkt hinter dem Spiegel muss den Windkräften und ihrem Eigengewicht widerstehen (Abbildung 1.2.8.3).

### 8.3 Beispiel für den Effekt abhängig von Windgeschwindigkeit auf den jährlichen Ertrag

Abhängig von den Windgeschwindigkeiten vor Ort (hier PSA 2002/2003), muss eine hohe optische Performance bis zu Geschwindigkeiten von 10 m/s eingehalten werden (Abbildung 1.2.8.4).

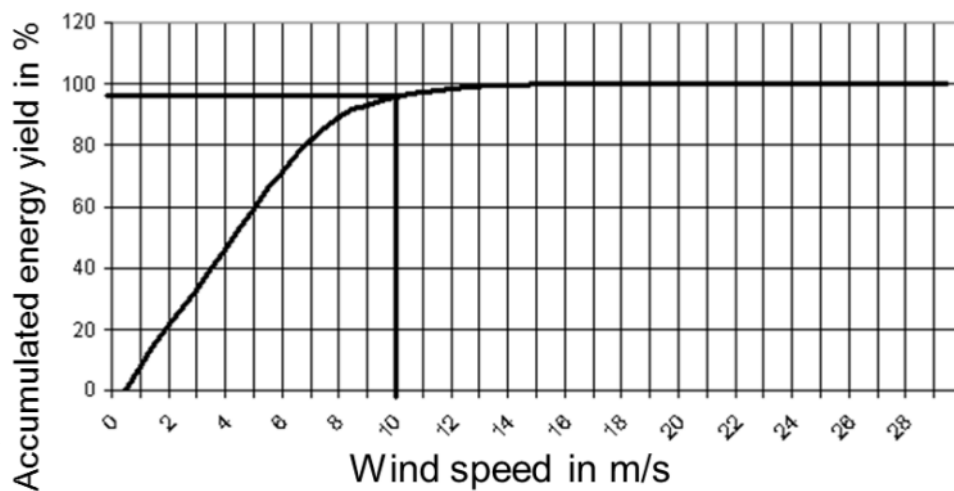


Abbildung 1.2.8.4: Akkumulierter Energieertrag als eine Funktion der Windgeschwindigkeit

Die meiste Einstrahlung (> 95%) findet bei niedrigen Windgeschwindigkeiten statt. Hohe DNI ist also an diesem Standort mit geringen Windgeschwindigkeiten korreliert. Verluste durch windbedingte Verformungen über 10 m/s werden hingenommen, da sonst zu große Investitionen in eine stärkere Kollektorstruktur nötig wären.

## 8.4 Design Kriterien

Für die Auslegung müssen verschiedene Fälle in Betracht gezogen werden.

### Überlebensfall

Die Struktur muss in der sogenannten Schlafposition maximalen Windgeschwindigkeiten widerstehen ohne bleibende, plastische Verformung z.B. bei 120 km/h (Abbildung 1.2.8.5). Für den ConSol Kollektor sollte die Schlafposition festgelegt werden (evtl. mit der Hilfe einer Berechnung). Auch die maximal anzunehmende Windgeschwindigkeit muss festgelegt werden.

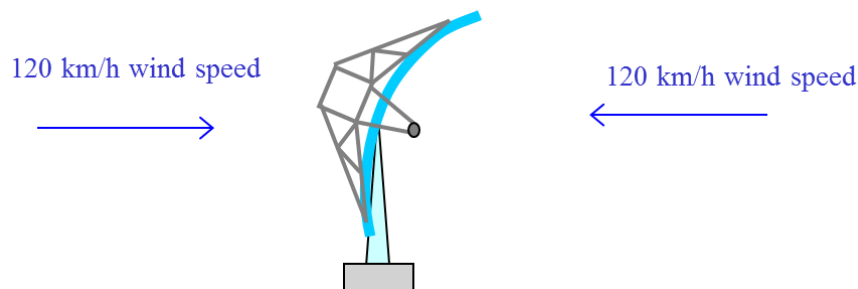


Abbildung 1.2.8.5: Übliche Schutzstellung für Kollektoren

### Aus Betrieb in Schlafposition fahren

Die Struktur muss aus dem Betrieb in die Schlafposition fahren können ohne bleibende, plastische Verformung bei ca. 60 bis 70 km/h (Abbildung 1.2.8.6).

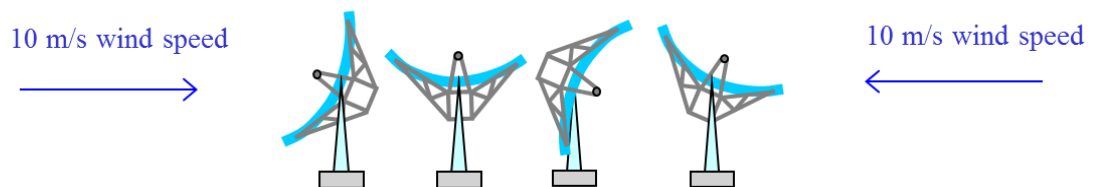


Abbildung 1.2.8.6: Bewegung des Parabolrinnenkollektors

### Betrieb

Die Verformung einschließlich Torsion durch Windlasten im Betrieb sollte in einem Rahmen bleiben, der die Einhaltung der gewünschten optischen Performance ermöglicht. Dabei müssen Toleranzen der Komponenten und Fertigungstoleranzen berücksichtigt werden. Ziel ist unter den gegebenen Betriebslasten einen Interceptfaktor  $\geq 97\%$  zu erhalten, was für die vorgesehene Geometrie als Referenz anzusehen ist. Die definierte Windgeschwindigkeit für den Betrieb ist abhängig vom Standort (in diesem Fall PSA) und muss gegebenenfalls für windreichere Standorte angepasst werden, was wiederum eine Überprüfung der Struktur nach sich zieht. Jedoch sind beim Betrieb großer Solarfelder die Windgeschwindigkeiten im Feld durch benachbarte Kollektoren und Schutzzäune stark reduziert, sodass die 10 m/s bei freier Anströmung als gute Referenz angesehen werden können. Der Zusammenhang zwischen Trackingabweichung und Wirkungsgrad wird in den folgenden Graphiken (Abbildung 1.2.8.7 und Abbildung 1.2.8.8) verdeutlicht:



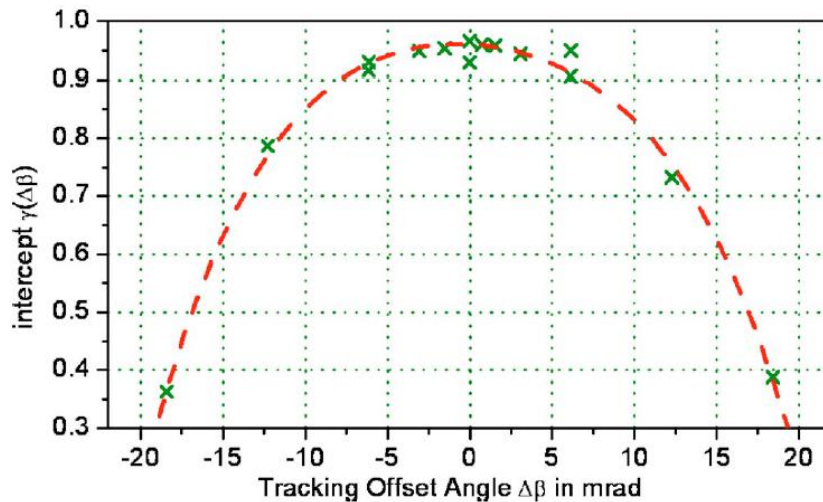


Abbildung 1.2.8.7: Ergebnisse von thermischen Tests mit Variationen des Tracking Offset. Die Performance verringert sich deutlich ab 5mRad Abweichung zwischen der optischen Achse und der einfallenden Strahlung. (Quelle: LÜPFERT, Eckhard, et al. Parabolic trough optical performance analysis techniques. Journal of solar energy engineering, 2007, 129. Jg., Nr. 2, S. 147-152.)

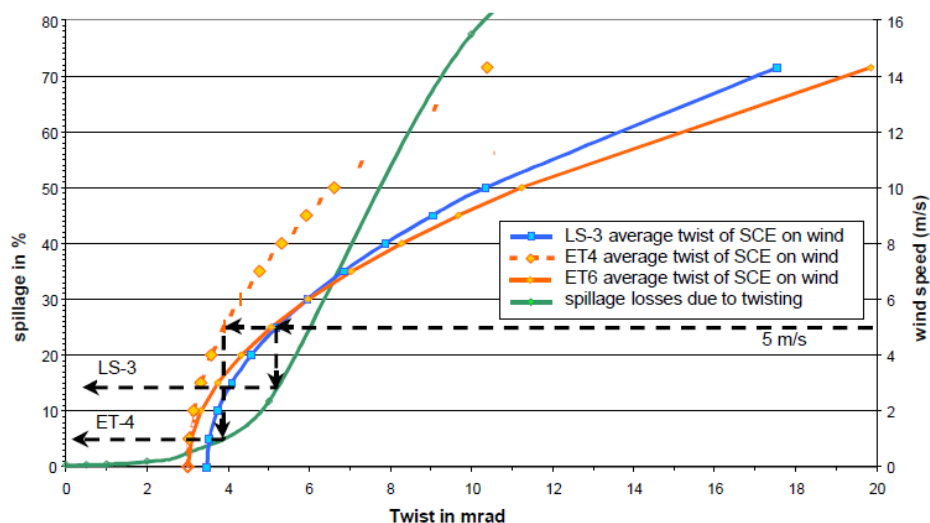


Abbildung 1.2.8.8: Analyse der Winkelverdrehung und Verlusten infolge von Windlasten auf Kollektoren vom Typ Eurotrough (100 und 150 m Länge) und dem Referenzkollektor (LS-3). (Quelle: LÜPFERT, Eckhard, et al. Eurotrough design issues and prototype testing at PSA. Solar Engineering, 2001, S. 387-392.)

## 8.5 Inputs und Definitionen für die Verformungsanalyse

### Allgemeine Angaben

Geometrie wie Eurotrough:

Aperturlänge 12 m

Aperturweite 5,77 m

Fokallänge 1,71

Receiverlänge 4,06 m

Jedes SCE hat drei Receiversupports

Thermische Dehnung eines Receivers auf 60 m beträgt 400mm, die durch die bewegliche Receiveraufhängung aufgefangen werden müssen

#### Genauigkeit

- Die angestrebte Genauigkeit der Receiveraufhängung liegt bei 1 mRad
- Deformation der Spiegeloberfläche < 2mRad
- Maximale Verdrillung ca. 5 mRad bei 7 m/s Windgeschwindigkeit

Für die Berechnung der Windlasten sollen die oben genannten drei Lastfälle berücksichtigt werden, um die Kräfte, die durch Wind auf einem Parabolrinnen wirken, abzubilden.

- Überlebensfall: 33 m/s
- Fall aus Betrieb in Schlafposition fahren: 15 m/s
- Betriebsfall: 10 m/s

Im Überlebensfall und im Fall aus Betrieb in Schlafposition fahren soll sichergestellt werden, dass der Kollektor keine bleibende Verformung erfährt.

Die RUB hat Windtunnelversuche durchgeführt, in der Lasten gemessen wurden. Diese sollen hier zugrunde gelegt werden.

Da die meisten Kollektoren im Feld platziert sind ist es sinnvoll zunächst die Lasten für eine „innere Reihe“ zu definieren.

Die Lastrichtungen sind üblicherweise definiert als:

- Horizontale Kraft:  $f_x$
- Vertikal Kraft:  $f_z$
- Nickmoment:  $m_y$ .

Die Horizontalkraft und die vertikale Kraft bilden den Druck auf der Spiegeloberfläche und dem Zug auf seiner Rückseite ab. Insbesondere das Nickmoment ist wichtig für die Konstruktion der Elemente, die die Torsionssteifigkeit ausmachen (Abbildung 1.2.8.9).



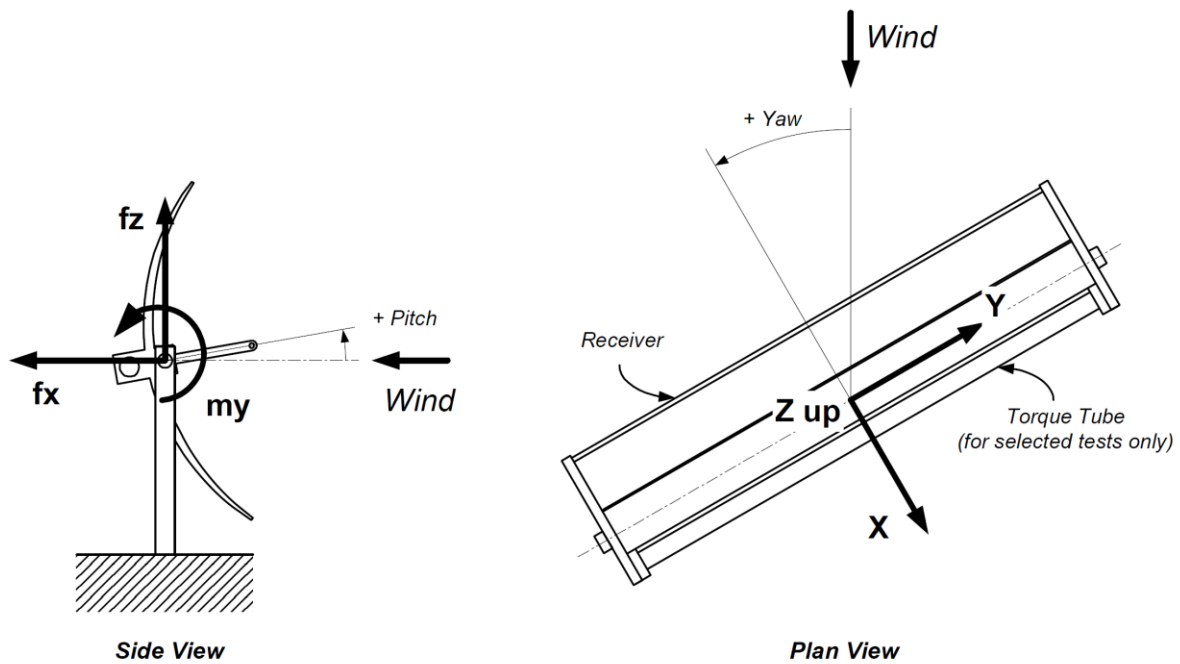


Abbildung 1.2.8.9: Definition des Koordinatensystems

## 8.6 Andere Lasten

Gewicht und Friktion durch ball joints am Ende des SCA summieren sich zu 650 Nm. Bei den Lagern in LS3 Typ Kollektoren wird ein durch Reibungskräfte induziertes Moment von 200 Nm angenommen. Diese Reibung kann noch verstärkt werden durch nicht ideal ausgerichtete Kollektoraufhängungen. Der Effekt ist aber nicht quantifizierbar. Er soll durch eine Sicherheitsmarge berücksichtigt werden (Tabelle 1.2.8.1).

Momente durch statische Unwucht wurden abgeschätzt anhand des Gewichts eines Moduls (ca. 10 to.) und der Fertigungstoleranzen bei der Einhaltung des Schwerpunktes und der Montage der Drehachse (< 5 mm). Das sich daraus ergebende Moment variiert zwischen 0 Nm (Schwerpunkt und Achse liegen übereinander) und

$$9.81 \text{ m/s}^2 * 10000 \text{ kg} * 0.005 \text{ m} \approx 500 \text{ Nm}$$

Tabelle 1.2.8.1: Andere Lasten

	Moment in Nm
Ball joints	650
Lagerreibung/SCE	200
Ungleichgewicht per SCE	500

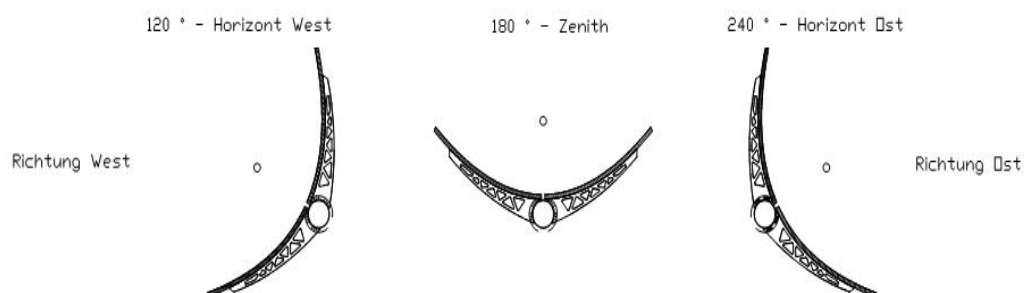
## 9. Definition der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an einen Antrieb

Das Nachführsystem ist eines der essentiellsten und wichtigsten Bauteile von konzentrierten Solarkollektoren. Die optische und thermische Effizienz des Gesamtsystems hängt zum großen Teil von der Genauigkeit der Positionierung des Kollektors, in Bezug auf den Sonnenstand ab. Die einfallenden Sonnenstrahlen müssen bei einem optimalen Betrieb immer in einem rechten Winkel auf den Kollektor treffen.

Das Ziel ist es eine einachsige Nachführsystem zu entwickeln, welches es ermöglicht, den Kollektor kontinuierlich und mit einer ausreichenden Genauigkeit dem Sonnenstand nachzuführen. Dies soll mittels des ausgegebenen Sollwertes des Solarnachführungsalgorithmus (Algorithmus von PSA) und eines Abgleiches mit einem Solarsensor erreicht werden.

Dieses Dokument soll zum einen beschreiben welche Funktionen, Spezifikationen und Performance ein SPS gesteuertes einachsige nachgeführtes Antriebssystem aufweisen muss und zum anderen welche ökonomischen Grenzen eingehalten werden müssen, um dieses System zur Marktreife zu bringen. Es sollen zwei Varianten für die weitere Betrachtung geprüft werden. Die erste Variante beinhaltet einen kleineren Antrieb welche auf beiden Seiten jeweils ein Segment antreiben soll (ein Segment hat eine Apertur von 5,77m und eine Länge von 12m). Die zweite Variante betrachtet einen größeren Antrieb, welcher auf jeder Seite jeweils fünf Segmente bewegen soll.

Das Antriebssystem ist so auszulegen, dass eine Anbindung an die Betonstruktur möglich ist. Des Weiteren sollte das Antriebssystem eine maximale Rotationsbewegung des Kollektors ermöglichen. Das System sollte dazu in der Lage sein den Kollektor in variablen Geschwindigkeiten anzutreiben, um die unterschiedlichen Betriebszustände zu gewährleisten. Die Antriebsgeschwindigkeit während des automatischen Sonnennachführmodus sollte zwischen  $10^\circ$  to  $15^\circ/\text{h}$  betragen. Für alle anderen Betriebsarten sollte der Antrieb eine Geschwindigkeit von  $\leq 30^\circ/\text{min}$  erreichen. Alle Kollektoren sollten einzeln ansteuerbar sein. Es soll eine Positionsgenauigkeit von  $\leq 0,1^\circ$  während des Sonnennachführmodus erreicht werden (siehe Abbildung 1). Der Kollektor bewegt sich kontinuierlich zu einem in Echtzeit kalkulierten Winkel des Solarnachführungsalgorithmus, welcher durch die Korrespondenz zwischen Winkelsensor und Antriebseinheit eingestellt wird. Optional kann ein Solarsensor mit eingebaut werden, um eine größere Signalauflösung für die Sonnennachführung zu erhalten.



**Abbildung 9-1: Bewegungsbereich des Kollektors**

## 9.1 Hardware

Das Antriebssystem sollte folgende Komponenten beinhalten.

### a. Antriebssystem

Das Antriebssystem solle eine Rotationsbewegung mit einer maximalen Spanne ermöglichen. Diese beinhaltet die Schlaf- und Sicherheitspositionierung auf beiden Seiten (Ost und West). Das Antriebssystem muss dabei eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber allen rauen globalen Witterungsbedingungen aufweisen, wie zum Beispiel Sandstürme, feuchtes Klima, salzhaltige Luft und verschmutzte Luft in industriellen Gebieten, etc. Damit eine gute bis sehr gute Effizienz des Kollektors erreicht werden kann, soll eine Positionsgenauigkeit von  $\leq 0,1^\circ$  eingehalten werden. Das System sollte aus standardisierten Komponenten entwickelt werden, damit eine einfache und gesicherte Beschaffung/ Wartung gewährleistet ist. Zusätzlich sollte der nötige elektrische Eigenverbrauch der Einheit so gering wie möglich gehalten werden.

### b. Lokaler Controller

Der lokale Controller besteht aus einem Schaltkasten, der die Nachführungs-SPS beinhaltet. In ihm werden alle Signale gesammelt, die von der Schaltzentrale, dem Winkelsensor und dem Temperatursensor eintreffen. Der Schaltkasten soll mit allen nötigen Eingangs- und Ausgangsterminals ausgestattet sein.

Einzelheiten und Beschreibung des lokalen Controllers und seiner Bedienung sind geschützte Informationen der Solarlite CSP Technology GmbH und werden nicht mit Dritten geteilt, ohne die ausdrückliche Genehmigung (schriftlich) von Solarlite.

### c. Winkelsensor

Es muss an jedem Kollektor ein Winkelsensor angebracht werden, welcher ein kontinuierliches Signal über die aktuelle Positionierung an den lokalen Controller übermittelt. Dieses Signal wird verarbeitet, um die eine akkurate Positionierung des Kollektors in Bezug auf den Sonneneinfallswinkel einzustellen. Mögliche Winkelsensoren sind:

- Neigungssensor
- Drehgeber
- Und/ Oder ein Solarsensor in eventueller Kombination mit einem der beiden vorher genannten Sensoren

Die Auflösung des Sensors sollte  $0,01^\circ$  und die Winkelgenauigkeit kleiner  $0,05^\circ$  betragen.

### d. Temperatur Sensor

Von der Prozessführung vorgesehen und in Betracht der Sicherheit des Absorber muss an jedem Kollektor ein Temperatursensor angebracht sein mit einem 4...20 mA anlagen Ausgang. Der 24V DC Versorgung für den Sensor wird über den angebrachten Schaltkasten am Kollektor sichergestellt.

## 9.2 Betriebsarten

Die folgenden Betriebsarten müssen verfügbar sein um einen optimalen Betrieb und Wartung des Kollektors zu ermöglichen. Die variable Bewegungsgeschwindigkeit der Antriebseinheit hilft die zwei übergeordneten Bewegungsarten zu realisieren.

**Schnelle Geschwindigkeit** (fast speed mode): Stow mode, Step mode, Defocus, Start-up (von jeglicher Position bis der Kollektor den vorher berechneten Sonnenstandswinkel erreicht hat).

**Langsame Geschwindigkeit** (slow speed mode): automatischer Sonnennachführmodus, Detrack

### a. Stow mode (Sicherheitsmode, Schlafposition):

Dieser definiert die Sicherheitsposition des Kollektors, die durch Windlastsimulation bestimmt wird. In dieser Position werden die geringsten negativen Einflüsse auf den Kollektor ausgeübt.

### b. Step mode (manuelle Steuerung):

Dieser erlaubt es dem Bediener den Kollektor manuell in jede gewünschte Position zu bewegen (Spiegelreinigung, Wartung, etc.).

### c. Defocus:

Dieser Mode wird genutzt um Kollektor aus dem Fokus, auf einen bestimmten Winkel zu drehen. Sobald dieser Modus aktiviert wird dreht sich der Kollektor immer in östlicher Richtung. Es gibt drei verschiedene Arten der Defokussierung während des automatischen Betriebs.

1. Defocus and track: In diesem Fall hat die Temperatur des Fluid in dem Absorber die maximale Betriebstemperatur erreicht. Der Kollektor fährt umgehend auf einen vorher definierten Winkel außerhalb des Fokus und fährt dann weiter in diesem Abstand dem Sonnenwinkel hinterher. Sobald die minimale Betriebstemperatur wieder erreicht wurde bewegt sich der Kollektor wieder in den Fokus.
2. Defocus and Stop: In diesem Fall hat die Temperatur des Fluids den maximale Bereich des Temperatursensors erreicht. Der Kollektor fährt umgehend aus dem Fokus und stoppt dort seine Bewegung. Eine weitere Bewegung des Kollektors ist nur unter manueller Steuerung möglich.
3. Defocus and Stop während Stromausfall: Dieser spezielle Fall ermöglicht es dem Kollektor auch ohne Stromversorgung sich außerhalb des Fokus, in östlicher Richtung, zu bewegen.

### d. Startup mode:

Diese Mode startet alle Kollektoren von jeglicher Stow-Position in Richtung des Sonnenstandes mit schneller Geschwindigkeit. Sobald diese erreicht wurde, wird automatisch auf die Sonnennachführungsgeschwindigkeit geregelt.

**e. Automatic sun tracking (Sonnennachführmodus):**

Der Sonnennachführmodus wird mit der langsamen Geschwindigkeit gefahren. Er bewegt den Kollektor kontinuierlich dem Sonnenstand nach. Während der Nachführung darf der gemessene Winkel vom Winkelsensor maximal  $\pm 0.05^\circ$  vom der berechneten Position abweichen. Wenn diese Abweichung größer wird dann wird der Kollektor automatisch neu positioniert.

**f. De-Track offset:**

Dies ist ein spezieller Modus, indem der Kollektor automatisch mit einem Offset dem Sonnenstand nachgeführt wird. Dies erlaubt es einen definierten Anteil der Sonnenstrahlung aufzunehmen, um somit den Eintrag der Sonnenenergie auf bestimmtes Maß zu begrenzen. Dies wird z.B. angewendet wenn die DNI höher ist als der Auslegungspunkt der Gesamtanlage. Dies ist eine alternative Betriebsart zu *defocus and track*.

**g. Andere Positionierungen**

Dies können jegliche Positionierungen sein, die vorher definiert wurden (z.B. Regenwaschposition, Spiegelwaschposition für Waschfahrzeug, Wartungsposition, etc.). Sie werden meist mit der schnellen Geschwindigkeit angefahren.

### 9.3 Gewünschte technischen Merkmale

Die folgenden technischen Merkmale sind für eine optimale Nachführung gewünscht.

Art der Nutzung	Außenanwendung	
Standorttypen	Wüsten, tropische Regionen, Küstenregionen (salzhaltige Luft), stark belastete Luft in Industrieanlagen	
Arbeits- / Betriebstemperatur	- 40 °C / + 70 °C	
Lager- / Transporttemperatur	- 40 °C / + 70 °C	
Luftfeuchte	0 - 100 % relative Feuchte	
Andere Merkmale	Hohe UV-beständig, wasserdicht , Schutz gegen Sandstürme und salzhaltiger Luft	
Gesamtwinkelbewegung	maximal ( $\pm 90^\circ$ von Zenit?)	
Nachführungsgenauigkeit	$\leq 0.1^\circ$	
Drehgeschwindigkeit	10 – 15°/h (slow speed mode) 30°/min (fast speed mode)	
Winkelsensorauflösung	0.01°	
Winkelsensorgenauigkeit	< 0.05°	
Betriebsflüssigkeit	atoxisch, ungefährliches Medium, lange Lebensdauer	
Schutzbeschichtungen	Klasse II nach RNI 50191-001. Weiß lackiert (aufheizen bei Sonneneinstrahlung, standhafte Mehrschichtkonservierung zum Einsatz in rauen Umgebungen, hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastung	
Stromverbrauch	< 1 W pro m <sup>2</sup> Aperturfläche	
Lebensdauer	min. 10.000 Zyklen unter max. Last (ein Zyklus = Ost nach West und zurück)	
Schutzklasse	IP65	
Gewährleistung	2-3 Jahre	
Erdung	zum sicheren Betrieb erforderlich	
	<b>Kleines Antriebssystem</b>	<b>Großes Antriebssystem</b>
Anzahl der Segmente	2	6
Dimension des Segmente	5.77 m x 12 m	5.77 m x 12 m
Aperturfläche (m <sup>2</sup> )	138.5	415.4
Torsionsmoment (kNm)	TBD	TBD
Referenzwindgeschwindigkeit (m/s)	TBD	TBD

## 9.4 Schnittstellen-Software

Ist eine grafische Benutzeroberfläche, die es dem Team vor Ort ermöglicht die folgenden Aufgaben auszuführen

1. Prüfung des Nachführungssystems
2. Optimierung des Nachführungssystems in Bezug auf die Echtzeitanwendung
3. Kollektormontage
4. Einstellung der Nachführungssystemparameter

Die Steuerungssoftware sollte die folgenden funktionalen Kriterien erfüllen

- Die Software sollte auf einem Laptop installiert werden können welcher mindestens mit einem Windows7 Betriebssystem ausgestattet ist, oder höher.
- Die Software sollte in der Lage sein, jeden angeschlossene lokalen Controller selbstständig zu erkennen (Plug and Play).
- Die Software soll es dem Anwender ermöglichen jede der möglichen Betriebsarten auszuführen.
- 

## 9.5 Schnittstelle für Auslegung Antriebssystem

Die folgende schematische Darstellung zeigt die Schnittstelle zwischen der Auslegung der Antriebseinheit (Pfeifer) und der Steuerungseinrichtung (Solarlite). Die Antriebseinheit soll nach den oben genannten Parametern (Abschnitt 8.3) ausgelegt werden. Die Einheit wird angesteuert von dem lokalen Controller und soll jederzeit eine Rückmeldung über die derzeitige Position an den Controller übermitteln. Die hier gezeigte Antriebseinheit wird als hydraulisch angetrieben dargestellt und ist mit einer Sicherungseinheit, für die Betriebsart Defocus and Stop, ausgerüstet. Dieses Schema ist ein erster Vorschlag der Firma Solarlite.

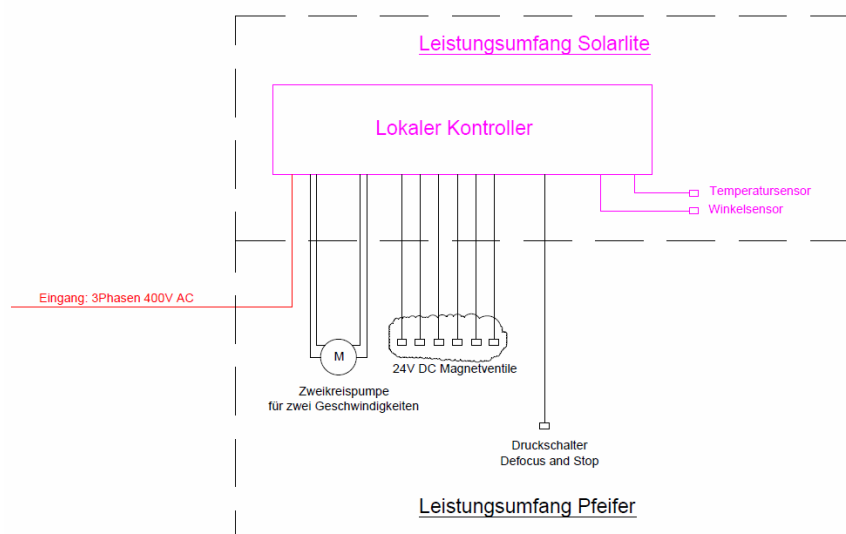


Abbildung 9-2: Schematische Darstellung Antriebssystem

## 9.6 Handgerät für Kollektorinstallation (optional)

Dieses Handgerät ist zur rudimentären Ansteuerung des Kollektors. Es soll durch eine einfache Schnittstelle mit den lokalen Kontrollern verbunden werden und es dem Anwender ermöglichen durch einfaches bedienen der Schaltelemente den Kollektor in beide Richtungen und in jeglicher Geschwindigkeit zu bewegen.

## 9.7 Wirtschaftliche Anforderungen

Das Antriebssystem, mit allen seinen Komponenten, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten eines Solarkollektors. Das System soll zum einen die vorher angesprochenen Eigenschaften der Präzision und der Robustheit erfüllen, aber es muss dabei eine Kosteneffizienz erreichen, die es dem Betonkollektor ermöglicht Wettbewerbsfähig zu sein. Die folgenden Kollektorantriebe sollen eine Preisindikation geben:

- Solarlite-BR Antriebssystem: Dieses System besteht aus zwei Zylindern, einer Hydraulikeinheit und einem lokalen SPS-Kontroller. Dieses System arbeite verlässlich seit 2010 in Thailand. Ein Antriebssystem dieser Art ist in der Lage einen Kollektor von einer Gesamtaperturfläche von insgesamt 552 m<sup>2</sup> zu bewegen und kosten zusammen mit allen notwendigen Sensoren ca. 3.500 € (für große Einheiten größer 100.000m<sup>2</sup> Aperturfläche). Die spezifischen Kosten betragen somit 6.4 €/m<sup>2</sup>. Diese Preisindikation beinhaltet weder ein automatisches Defocus-System noch eine UPS für Pumpen.
- Solarlite Antriebssystem: Solarlite entwickelte einen eigenen Kontroller mit Antriebskomponenten von renommierten Herstellern. Dieses System ist mit einem Defocus-Modus ausgestattet. Als Richtwert kann ein Preis von ca. 4.300 €, für kleinere Anlagen ~15.000 m<sup>2</sup>, angenommen werden (7,8 €/m<sup>2</sup>).
- Weiter Indikationen können von anderen Kraftwerken (Andasol) hinzugezogen werden, nur sind diese nicht genau aufgeschlüsselt. Antriebseinheit ohne Kontroller und Sensoren kosten ca. 2.500 € pro Kollektor, mit einer Aperturfläche von 818 m<sup>2</sup> (3,1 €/m<sup>2</sup>). Andere Quellen (IDAE11) sprechen von Preisen um 8,1 €/m<sup>2</sup>.

Die oben genannte Indikationen zeigen, dass sein Antriebssystem inklusive Kontroller, Hardware und Sensoren zwischen 5 und 8 €/m<sup>2</sup> liegen. Der zu erreichende spezifische Preis, für das Antriebssystem des Betonkollektor (ohne lokalen SPS-Kontroller) sollte in einem Bereich zwischen 3 und 5 €/m<sup>2</sup> liegen.



## **10. Objektplanung/Erstellung Unterlagen für Baugenehmigung**

Die für die Baugenehmigung notwendigen Unterlagen sind in den Abschnitten 14: Schal-, Bewehrungs- und Montageplänen sowie in Arbeitspaket 2 Abschnitt 3: Festlegung der Unterbauten zusammengefasst.

Hier sind alle statischen Berechnungen sowie alle notwendigen Pläne aufgeführt. Die Baugenehmigung ist letztendlich am 05.04.2017 durch das Amt für Bauen und Wohnen der Stadt Paderborn erteilt worden. Die Nutzungsdauer ist auf 5 Jahre befristet und endet am 05.04.2022.

## **11. Verformungsberechnungen**

siehe Arbeitspaket 1.1.1 Betontechnik sowie Arbeitspaket 2, Abschnitt 3 Festlegung der Unterbauten

## **12. Abschätzung des daraus resultierenden optischen Wirkungsgrads und Berechnung der ökonomischen Auswirkungen von Verformungen**

Formfehler sowie Reflektivitätsverluste der Spiegel haben starken Einfluss auf den optischen Wirkungsgrad eines Kollektors. Beispielhaft wird in diesem Kapitel der Einfluss eines reduzierten Interceptfaktors auf die Stromgestehungskosten untersucht. Der Interceptfaktor beschreibt die Verluste, die durch ungenaue Formgebung der reflektierenden Oberfläche sowie die Lageabweichung des Absorberrohrs verursacht werden. Die Ungenauigkeiten führen dazu, dass reflektierte Lichtstrahlen das Absorberrohr verfehlen, und deren Energie somit verloren geht.

In diesem Beispiel wird ein Parabolrinnenkraftwerk mit 1760 EuroTrough-Kollektoren mit einer thermischen Nennleistung von  $712 \text{ MW}_{\text{th}}$  am Standort Barstow/Daggett in Kalifornien untersucht. Die jährlich zur Verfügung stehende DNI beträgt  $2660 \text{ kWh/m}^2$ . Das Parabolrinnenfeld versorgt einen Power Block mit  $150 \text{ MW}_{\text{el}}$  Brutto-Nennleistung bei Nominalbetrieb mit  $390 \text{ MW}_{\text{th}}$  thermischer Energie. Die überschüssige Solarfeldleistung wird in einem thermischen Speicher mit einer Kapazität von 9 Volllaststunden zwischengespeichert.

Die Kosten für die Kraftwerkskomponenten sind [1] für das Jahr 2015 entnommen und mit dem Wechselkurs 1,2 \$/€ umgerechnet worden.

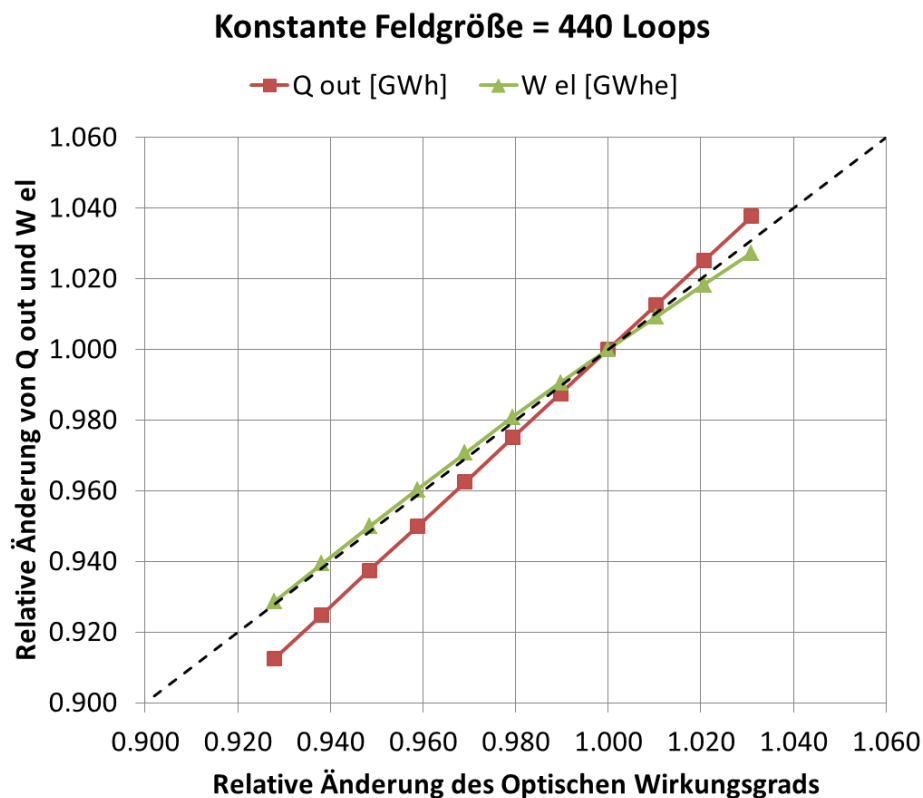
**Tabelle 2: Übersicht der Investitionskosten für die Hauptkomponenten des Solarkraftwerks**

Komponente	Investitionskosten
Solarfeld	193 €/m <sup>2</sup>
Thermischer Speicher	35 €/kWh
Power Block	1000 €/kW

Die gesamten Investitionskosten für das Kraftwerk inklusive Aufschlägen für Versicherung, Projektentwicklung, Inbetriebnahme und unvorhergesehene Ausgaben belaufen sich im Basisfall mit 440 Loops auf ca. 725 Mio. €.

Die Software *greenius* wurde eingesetzt, um die Abhängigkeit des Jahresertrags vom Interceptfaktor zu bestimmen. In *greenius* wird der optische Wirkungsgrad zur Charakterisierung der allgemeinen optischen Güte des Kollektors verwendet. der Interceptfaktor ist ein Anteil, der proportional in den optischen Wirkungsgrad einfließt. Im Basisfall beträgt der Interceptfaktor 97%, der resultierende optische Wirkungsgrad 75%.

Für dieses Beispiel wird der Interceptfaktor zwischen 90% und 100% variiert, wodurch der optische Wirkungsgrad Werte zwischen 69,6% und 77,3% annimmt. Die resultierende Wärme- und Stromproduktion des Kraftwerks sind in Abbildung 3 dargestellt: Die Wärmeproduktion nimmt bei sinkendem optischen Wirkungsgrad überproportional ab, weil im Solarfeld konstante Wärmeverluste anfallen.

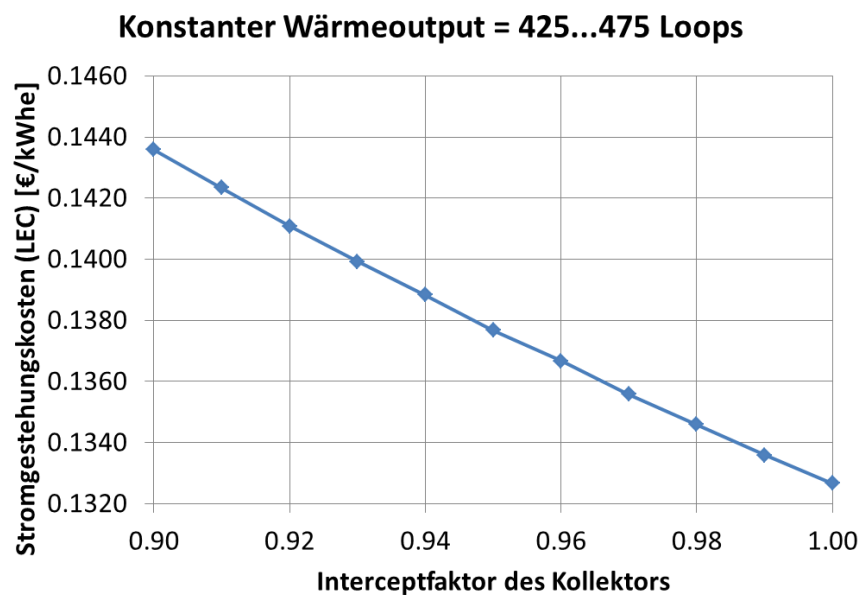


**Abbildung 3: Abhängigkeit der Wärme- und Stromproduktion vom optischen Wirkungsgrad. Die gestrichelte Linie stellt einen proportionalen Zusammenhang dar.**

Die Stromproduktion hingegen sinkt in etwa proportional mit dem optischen Wirkungsgrad. Dies wird durch die Gesamtkonfiguration des Kraftwerks erklärt. Aus ökonomischer Sicht ist eine geringe Überdimensionierung des Solarfelds sinnvoll um niedrige Stromgestehungskosten zu erhalten. Dadurch gibt es zwar in einigen Stunden des Jahres einen Überschuss an Wärme, der weder im Power Block noch im Speicher Verwendung findet (Dumping). Auf der anderen Seite erhöhen sich die Volllaststunden des Power Blocks signifikant. In diesem Beispiel führt die Überdimensionierung dazu, dass der überproportionale Verlust an thermischem Output nicht in gleichem Maße an die Stromproduktion weitergereicht wird. Stattdessen könnte ein Teil der thermischen Energie sowieso nicht verwendet werden, sodass der Einfluss auf die Stromproduktion gedämpft ist.

In der Summe führen die beiden beschriebenen Effekte dazu, dass in diesem Beispiel die Stromproduktion in etwa proportional mit dem optischen Wirkungsgrad bzw. dem Interceptfaktor absinkt.

Die optimalen Stromgestehungskosten für ein Kraftwerk werden in der Regel (abhängig von der Kostenstruktur) bei ca. 5-10% Dumping von der gesamten Wärmeproduktion erreicht. Somit würde man die bekannte Reduktion des optischen Wirkungsgrads durch die Erhöhung der Kollektoranzahl und somit Aperturfläche weitgehend kompensieren. Dies wurde in einer zweiten Parametervariation untersucht. Hierbei wurde die Anzahl der Loops des Solarfeld zwischen 425 und 475 Loops variiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4: Abhängigkeit der Stromgestehungskosten vom Interceptfaktor des Kollektors**

Ausgehend von Stromgestehungskosten von 13,56 €-ct bei 97% Interceptfaktor führt jeder verlorene Prozentpunkt beim Interceptfaktor zu einer Erhöhung der Stromgestehungskosten um 0,11 €-ct.

#### Literatur

[1] Simon Dieckmann, Jürgen Dersch, Stefano Giuliano, et al.: "LCOE reduction potential of parabolic trough and solar tower CSP technology until", SolarPACES Conference 2016, Abu Dhabi.

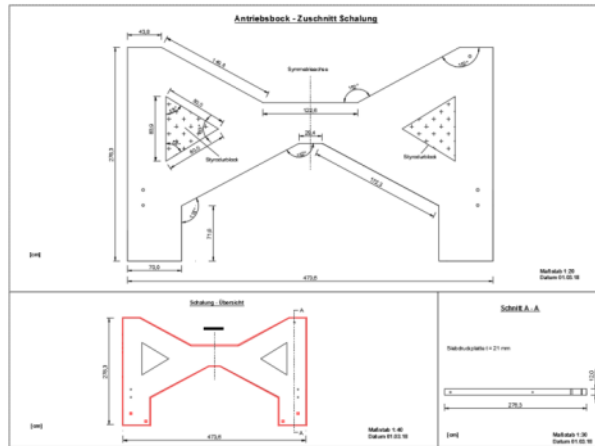
## 13. Schal-, Bewehrungs- und Montagepläne

Für die Herstellung des Demonstrators in Paderborn sind für folgende Bauteile Schal- und Bewehrungspläne erstellt worden:

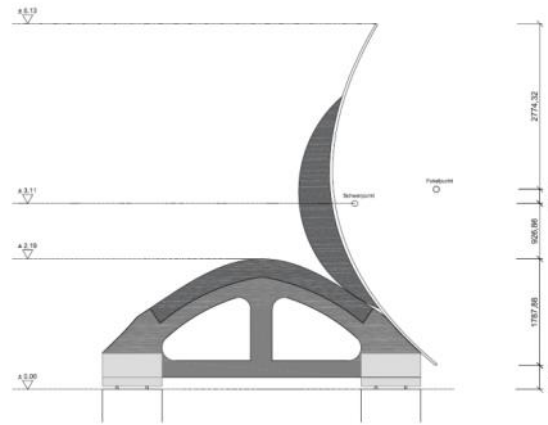
- Blockfundament Mittelaufleger
- Blockfundament Randaufleger
- Köcher Mittelaufleger
- Köcher Randaufleger
- Abrollhügel mit Verzahnung
- Sichel
- Zahnrad oben
- Antriebsbock

Insgesamt sind somit 24 unterschiedlichste Pläne gezeichnet worden. Hiervon sind im folgenden exemplarisch sechs Stück aufgeführt.

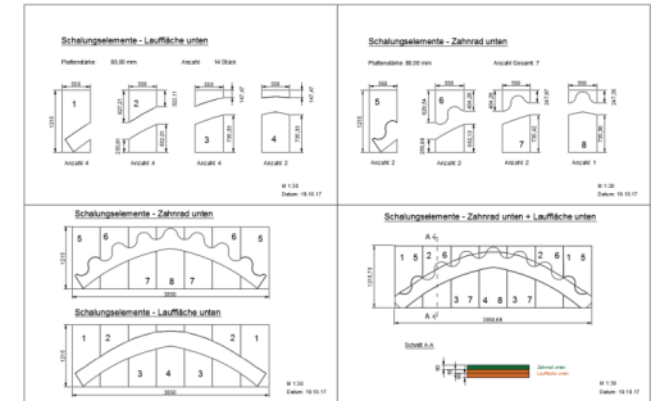
## Antriebsbock – Bewehrungsplan



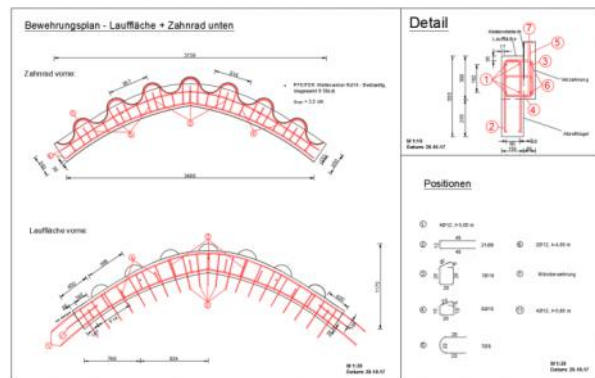
## Höhenplan



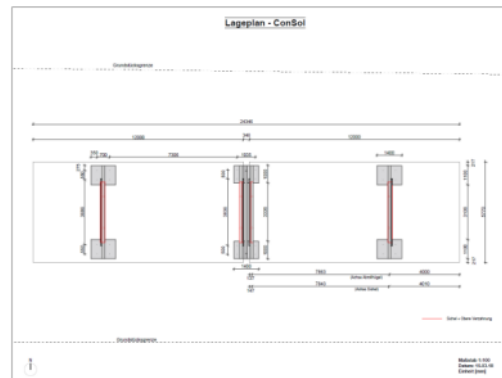
## Zahnrad und Sichel - Schalungsplan



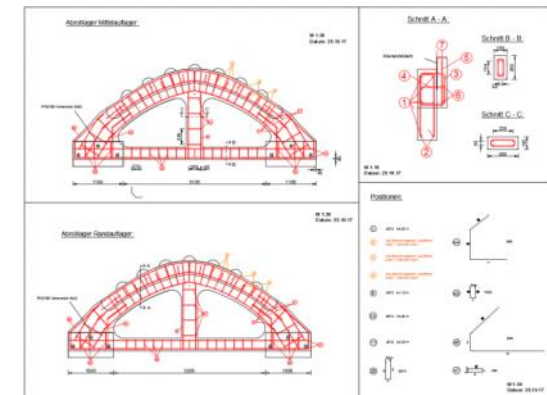
## Lauffläche – Bewehrungsplan



## Lageplan



## Abrollhügel – Bewehrungsplan



## 14. Entwicklung des elektrischen Antriebskonzepts und der Halterung und Montage

Die ausführliche Beschreibung der Auslegung und Konzeptionierung des elektrischen Antriebes wird in AP 2 Kap 9 ff. beschrieben. Dort wird auch die mechanische Integration als angetriebene Einheit dargelegt. An dieser Stelle wird hierauf verwiesen.

## 15. Entwicklung Verankerungskonzept und Lasteinleitung: Rechnerische Vordimensionierung und Versuche

### ■ Orbiterdimensionierung (Anker zum Anheben/Befestigen in Betonschale) (PFEIFER):

Das Anheben vom Schaltisch der über Kopf betonierten Schale erfolgt an je zweimal vier Orbiterankern. Diese sind speziell so geformt, dass die Last maximal weit unten in die Schale eingetragen wird und der Orbiter symmetrisch beidseitig wirken kann. An den dafür vorgesehenen Punkten werden PFEIFER Orbiter an der Schalung angebracht und mit der vorgesehenen Bewehrung versehen. Nach dem Betoniervorgang stehen damit Transportanker zum Anheben der Schale mit M30-Gewinden zur Verfügung.

In den Orbiter wird als Lastaufnahmemittel eine PFEIFER Seilöse eingeschraubt. Edelstahl im späteren Feld macht den Orbiter Korrosion unempfindlich, für Versuche ist blanker Stahl ausreichend.

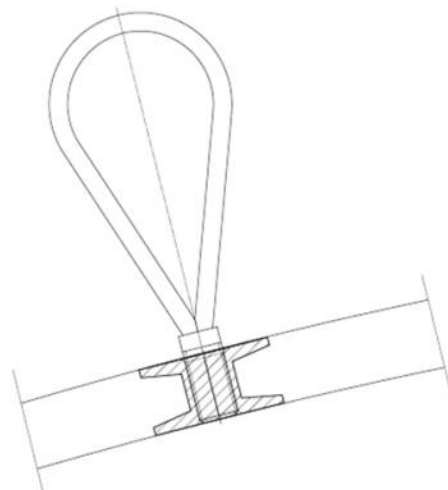


Abb. 1.2.15.1 und Abb 1.2.15.2 PFEIFER Orbiter als Realteil und in Schnittzeichnung mit PFEIFER Seilöse

Die Position der Orbiter über die Parabellinie erfordert zwei unterschiedliche Bauhöhen:

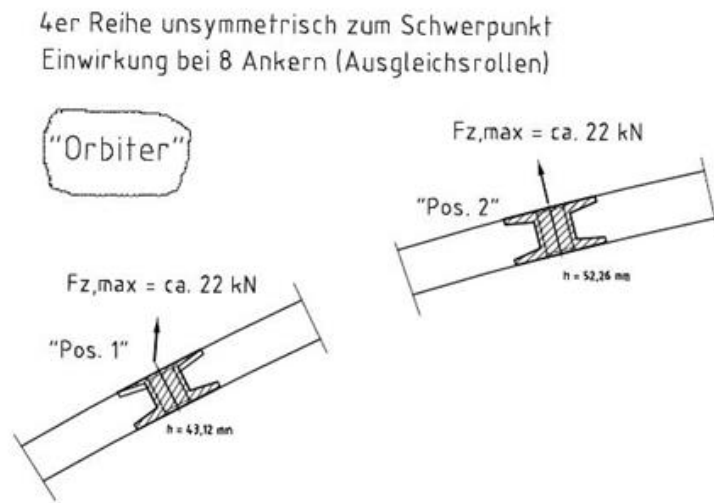


Abb. 1.2.15.3  
Orbiterkraftangriffe

Der Orbiter ist ein doppelt wirkender Anker mit je nach Position auf der dickenveränderlichen Mantellinie der Betonschale einmal 43 oder 52 mm Ankertiefe. Seine runden Lasteinleitungsplatten verteilen die Last und das durchgehende Gewinde erlaubt beidseitiges Einschrauben.

Es werden  $n=8$  Anker mit zwei Traversen mit Verteilerarmen und Umlenkrollen aktiviert. Je vier Anker pro Sichellinie machen die Schalenlast erträglicher. Im Vergleich zur ersten Auslegung sind die Positionen in Längsrichtung der Schale nicht mehr symmetrisch, was diese Neubetrachtung erfordert. Minimal 8 kN und maximal 22 kN wirken aufgrund von Eigengewicht von 92 kN und dynamischen Faktoren beim Anheben. Die eingerückte Position wird deutlich stärker belastet, wie die Balkenstatik zeigt.

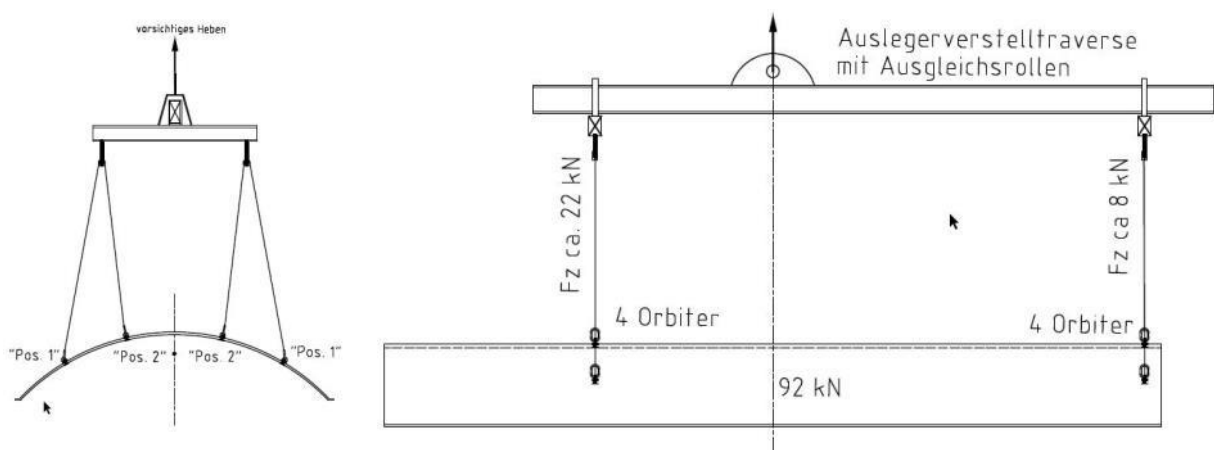


Abb. 1.2.15.4 und Abb. 1.2.15.5

Schale in Schnitt und Ansicht mit Orbiter angeschlagen über Rollengehänge und Traverse

Anstelle einer Traverse in Längsrichtung ist auch Anschlagen und Anheben mit zwei synchron betätigten Kranen möglich.

Es erfolgt das Ablegen in dieser Position auf einen Lagerstapel zur Trocknung/Aushärtung für etwa 28 Tage.

Nach dem Abheben wird die Schale an diesen 8 Orbitern abgelegt in dieser Überkopfposition auf ein Lagergestell.

Nach einer Härtephase von etwa 28 Tagen wird die Schale in gleicher Art vom Lagergestell gehoben und an den Ort gebracht, wo sie mit Sichel und Zahnrad zusammengefügt wird und dann in eine Drehvorrichtung zum Umdrehen aus der Überkopfposition gehoben wird.

### **Produktqualifikation Orbiter:**

Von der Anzahl her sind statistisch abgesicherte Versuche sind für den Nachweis des Widerstandes nötig.

- Nachweis durch Versuchsreihen, da keine Vorkenntnisse vorhanden.
- Statt ursprünglich Ermittlung des charakteristischen Widerstands (statistisch) in 3 Lastrichtungen, durch Traverse nur axiale Richtung in Prüfung nötig.
- Definition der Anwendungsbedingungen
- Festlegung Einbau-/Verwendungsanleitung
- CE-Deklaration/Übereinstimmungserklärung MD als Transportanker

Schalen-/Betondaten:

- Schalendicke im Mittelbereich 50 mm bei ausreichend großer Randabstand der Anker und Belastung nur in axialer Richtung.
- Höchstfester Nanodur-Beton E80 -Stanecker-Spezial-Mischung mit einer Druckfestigkeit von rund etwa  $f_{ck}=125 \text{ N/mm}^2$  und einem E-Modul  $\geq 80.000 \text{ N/mm}^2$ .

Musterteile je 1 m x 1 m mit unterschiedlicher Bewehrungsanordnung gemäß der Tabelle.

Versuchsanordnung nach der Skizze:



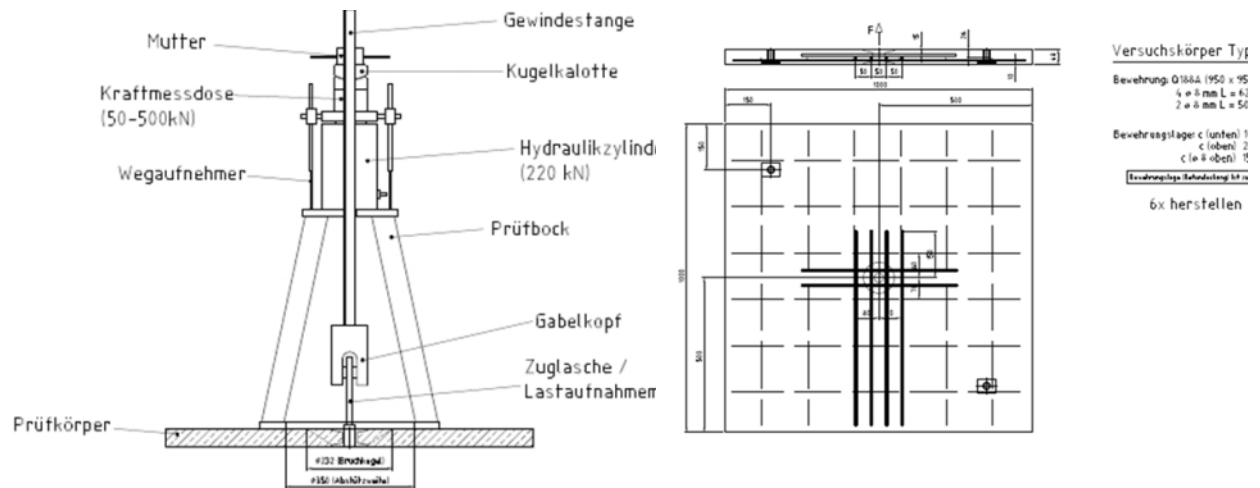


Abb. 1.2.15.6 und Abb. 1.2.15.7 Prüfanordnung im Schnitt und Draufsicht

Versuchsbezeichnung	Versuchsparameter				
	Neigungswinkel $\beta$ [°]	Ankerhöhe $h$ [mm]	Bauteildicke $d$ [mm]	Bewehrung [-]	Anzahl der Versuche $n$ [-]
Orbiter-Typ-1	0	48	48	Q188 + Längsstäbe	6
Orbiter-Typ-2	0	48	48	Q188 + Längs- / Querstäbe	6
Orbiter-Typ-3	0	48	48	Q188	6
Orbiter-Typ-4	0	48	48	ohne	6



Abb. 1.2.15.8 Orbiter in Schalung mit Stabbewehrung



Abb. 1.2.15.9 Orbiter in Schalung ohne Zusatzbewehrung



Abb. 1.2.15.10 Orbiterprüfvorrichtung



Abb. 1.2.15.11 Orbiter Versagensbild in Beton

Die Orbiter wurden bis zum Versagen herausgezogen. Digitale Aufzeichnungen aller Versuche wurden ausgewertet.

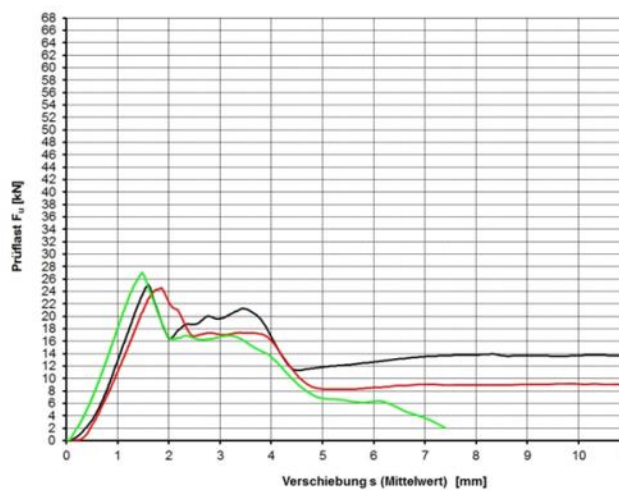


Abb. 1.2.15.12 Orbiter Typ 1

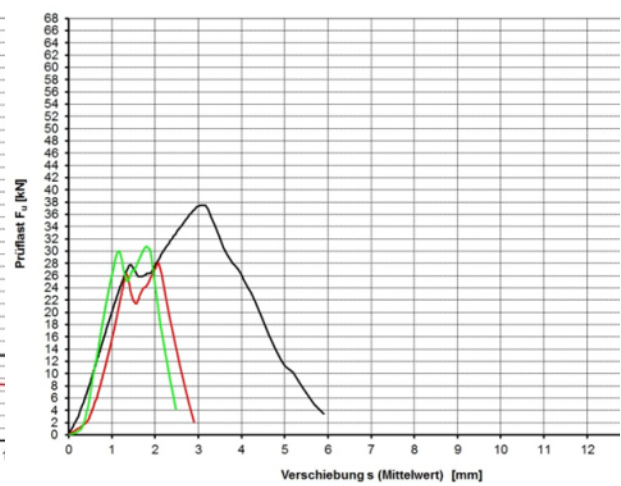


Abb. 1.2.15.13 Orbiter Typ 2

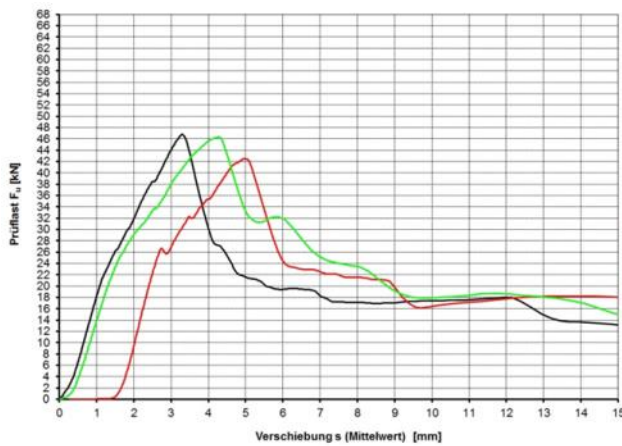


Abb. 1.2.15.14 Orbiter Typ 3

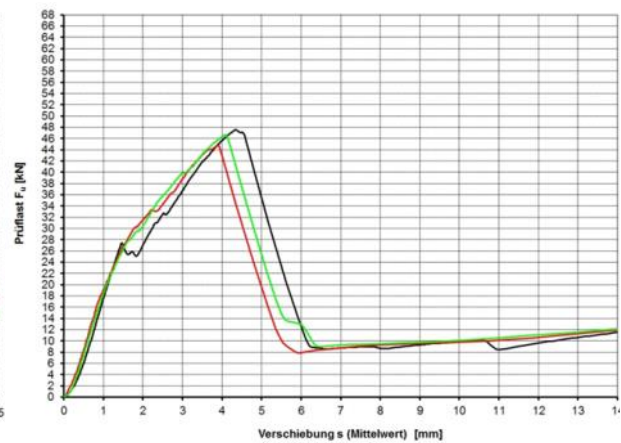


Abb. 1.2.15.15 Orbiter Typ 4

Die Beurteilung der Bauteilversuche erfolgt auf Grundlage der Richtlinie [1] VDI/BV-BS 6205 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), in der die Bemessung und Anwendung von Transportankern und Transportankersystemen für Betonfertigteile beschrieben ist.

Der zu berücksichtigende Betriebskoeffizient (Sicherheitsbeiwert) bei den Versagensarten Beton-ausbruch, Spalten, Blow-Out und Herausziehen beträgt gemäß [1], Abschnitt 8.2.2.3:  $\gamma_{C,min} = 2,1$

Die Ergebnisse wurden in einer Tabelle ausgewertet:

Versuchsbezeichnung	Bewehrung [-]	Beton- festigkeit $f_{cc,150}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	kleinstes erstes Last- maximum $F_{u,1}$ [kN]	5%-Fraktile $X_p$ [kN]	zulässige Widerstände $R_{zul}$ [kN]	Betriebs- koeffizienten $\gamma_{C,IST}$ [-]
Orbiter-Typ-1-1 / -3	Matte + Längsstäbe	61,2	27,4	41,55	19	2,19
Orbiter-Typ-2-1 / -3	Matte + Längs- / Querstäbe	61,2	26,7	37,28	17	2,19
Orbiter-Typ-3-1 / -3	Matte	61,2	26,3	15,74	7	2,25
Orbiter-Typ-4-1 / -3	ohne	61,2	24,6	21,30	10	2,13
Orbiter-Typ-1-4 / -6	Matte + Längsstäbe	83,8	33,5	30,80	14	2,20
Orbiter-Typ-2-4 / -6	Matte + Längs- / Querstäbe	83,8	36,7	43,14	20	2,16
Orbiter-Typ-3-4 / -6	Matte	83,8	27,3	50,32	23	2,18
Orbiter-Typ-4-4 / -6	ohne	83,8	27,0	21,58	10	2,16

Das Ergebnis ist ein zulässiger Widerstand von mehr als 22 kN für den gewählten Typ 3-4/-6 ohne Stabstahlbewehrung aber einer Matte. Damit ist die Orbiterqualifikation gezeigt.

## ■ Receiverhalterungen

Die Anordnung der Receiver ist von Solarlite festgelegt wie im unterem Bild gezeigt. Die roten drei kleinen rechteckigen Strukturen stellen die Platzierungen für die Receiverhalter dar. Pfeifer hat für die Randlage und die Mittenlage diese Receiver ausgelegt und bemessen.



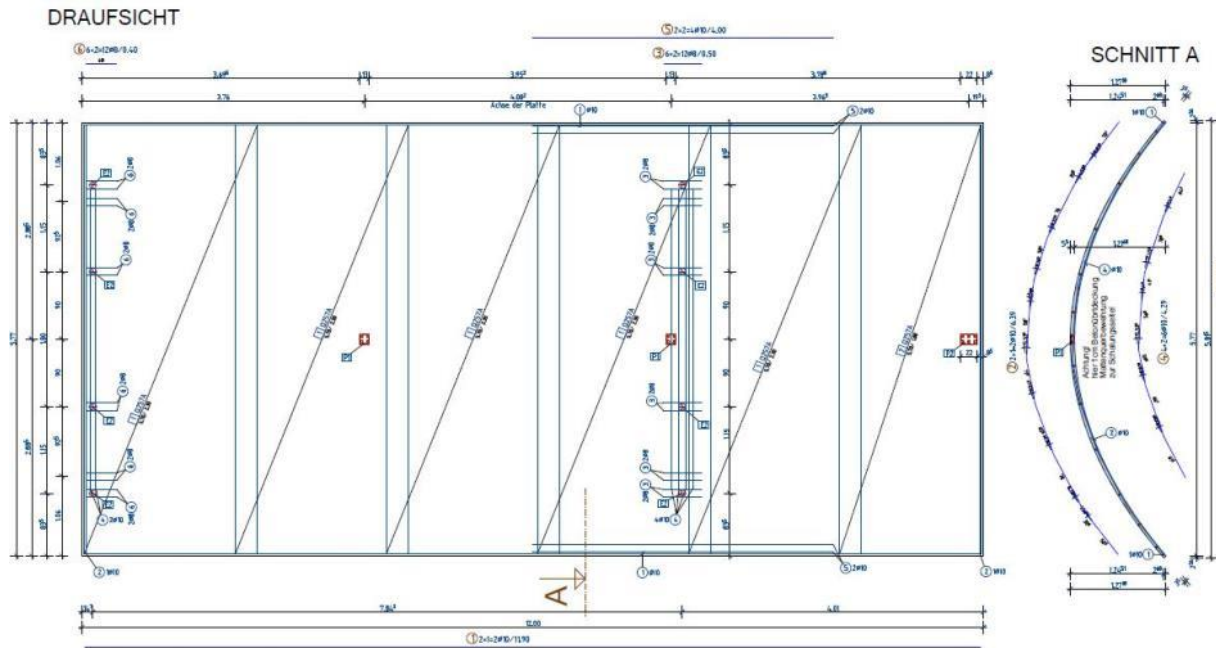


Abb. 1.2.15.16 Draufsicht Kollektor mit Receiverhalteranordnung (rote Rechtecke)

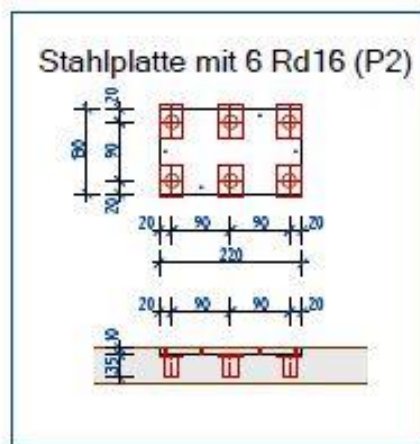
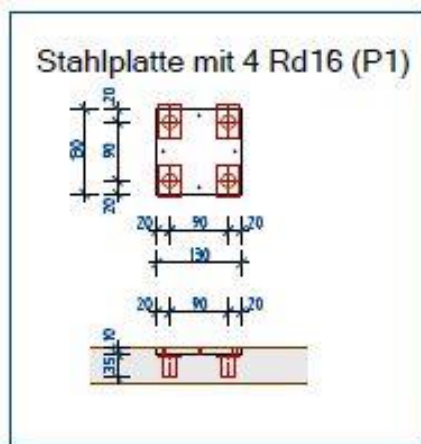


Abb. 1.2.15.17  
Zeichnungen  
der Receiver-  
halter für 4  
und 6 Schrau-  
ben im Feld  
und am Rand  
des Kollektors



Abb. 1.2.15.18  
Ausführungsbilder der  
Receiverhalter für 4 und 6  
Schrauben im Feld  
und am Rand des Kollektors

Bemessung: Festlegung für Näherungsbemessung

Vorbemessung: Bemessung mit FLA Rd12 [hef = 54mm] + Betongüte C50/60

NoRk,c = 22,1 kN

=> gew. Sonderflachstahlanker Rd16 [hef = mm] + Sonderbeton Nanodur C125

NoRk,c = 28,4 kN

Berechnungssoftware Pfeifer Suite

Vorbemessung

(Annahme: Lastverteilung über ausreichend steifes Stahl-Vierkantprofil sichergestellt)

Design-Beanspruchungen:

- aus G Halter/Receiver/Fluid (2m Einflussfläche) :

$V_x = 0,63 \text{ kN} \times (1/2)$  //  $M_y = 0,63 \text{ kN} \times 1,70 \text{ m} \times (1/2)$

- aus G 2. Receiverhalter am Rand :

$V_x = 0,18 \text{ kN}$  //  $M_y = 0,18 \text{ kN} \times 1,70 \text{ m} \times (1/2)$

- aus G Rohr/Kugelgelenke :

$V_x = 1,69 \text{ kN} \times (1/2)$  //  $M_y = 1,69 \text{ kN} \times 1,70 \text{ m} \times (1/2)$  //  $M_z = 1,69 \text{ kN} \times (1/2) \times 0,767 \text{ m}$

- aus Losbrechmoment: (614 Nm) :

$M_y = 0,92 \text{ kNm}$

- aus Versatz Lastangriff Querkraft  $V_x$  :

$M_z = 1,53 \text{ kN} \times (0,173 + 0,09) \text{ m}$

SUMME:  $V_x = 1,34 \text{ kN}$  //  $M_y = 3,05 \text{ kNm}$  //  $M_z = 1,05 \text{ kNm}$

Einbaulage für Bemessung idealisiert:

mit Randabstand = 900mm => tatsächlich vorhanden = 105mm

mit Zwischenabstand = 100mm => tatsächlich vorhanden = 90mm

Bauteilbeschreibung:

Schrägzug- / Querkugbewehrung: Nicht vorhanden

Schraubenbiegung: Nicht vorhanden

Randbewehrung: Gerade Randbewehrung ( $\geq 12 \text{ mm}$ ) + Bügel ( $s < 10 \text{ cm}$ )

Gerissener Beton normal bewehrt

## ■ Befestigungselemente Stahlprofil für Umlenkrolle Antriebsschiene.

Statische Berechnung, Abmessungen und Empfehlung für Baulager

### Berechnung der Auflagerkräfte

Lastannahme:

$$27,1 \text{ kN} \times 2 \times 2 \times 1,5 = 162.6 \text{ kN}$$

Einheiten: kN, cm

Nr	Koordinaten		Auflager			
	x	z	x	z	R	Verdrehung in Grad
1	0.000	0.000	J	J	N	0.000
2	100.0	0.000	N	J	N	0.000
3	120.0	0.000	N	N	N	0.000

Die Abmessungen beziehen sich auf die Achse des Ankers, der Last und des Auflagers (Das Stahlprofil muss an den beiden Enden verlängert werden.).

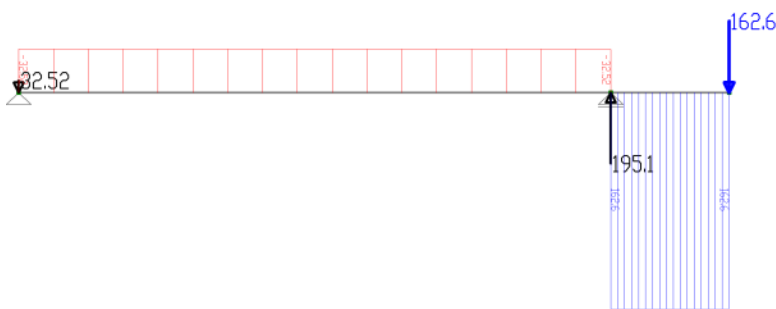


Abb. 1.2.15.19 Stat. System, Querkraft und Kräfte Stahlprofil

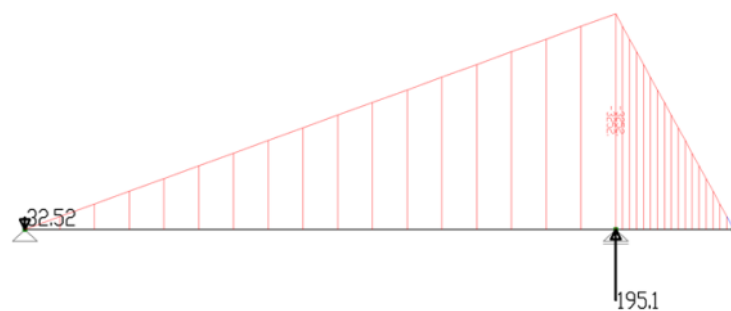


Abb. 1.2.15.20

Stat. System und Biegemoment Stahlprofil

Ergebnis: Die Tragfähigkeit des Ankers muss 32,52 kN betragen.

### Auflagerung Stahlprofil

Für eine gezielte Lasteinleitung sollte die Auflagerung des Stahlprofils mit einem Baulager erfolgen.

Bei einer trockenen Auflagerung sind gerade im Randbereich des Betonbauteils größere Abplatzungen zu erwarten. Die Dauerhaftigkeit wäre somit nicht mehr gewährleistet.

Da das Betongestell zur Aufnahme der Rinne als Fertigteil hergestellt wird und somit eine glatte und hochwertige Oberfläche zu erwarten ist, kann auf ein dickes Lager verzichtet werden.

Annahme:  $c_{\text{nom}} = 2,5 \text{ cm}$

Gewähltes Lager: Flächenloch™-Lager 205,  
 $t = 5 \text{ mm}$  mit einer zul. Druckspannung von  $25 \text{ N/mm}^2$

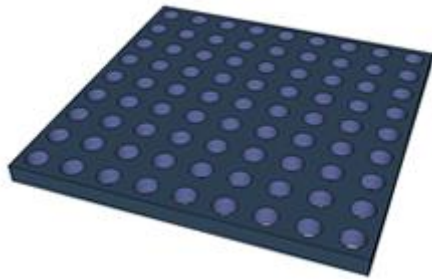


Abb. 1.2.15.21

Auflagerelastomer zur Lastzentrierung

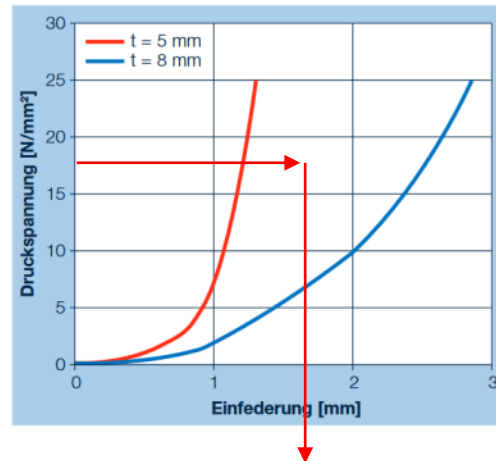


Abb. 1.2.15.22

Bemessungsdiagramm Elastomerlager

#### Lagerabmessungen oben:

$140 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} = 9800 \text{ mm}^2$

Spannungsnachweis:

$25 \text{ N/mm}^2 \geq 195.100 \text{ N} / 9800 \text{ mm}^2 = 20 \text{ N/mm}^2$

#### Lagerabmessungen unten:

$100 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ , Loch rund zentrisch

Das obere Lager ist vom oberen Rand um  $3 \text{ cm}$  einzurücken. Für eine Lagesicherung ist das obere Lager auf dem Stahlprofil dauerhaft zu befestigen!

Reale Ausführung und Anwendung:



Abb. 1.2.15.23

Kettenführung mit oberer Umlenkrolle und seitlichem Stahlprofil (gold-silberfarben) befestigt am Antriebsbock über die bemessenen Halteelemente



# ConSol

## Concrete Solar Collector

### Bericht AP 1.3

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011  
Förderkennzeichen: FKZ A-G  
Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebetechnik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
2.1 Arbeitsziel .....	4
2.2 Schnittstellen.....	4
3. Lastenheft Metallreflektor .....	4
4. Auswertung der Alumir Ergebnisse und Simulation optimierter Schichtsysteme.....	9
5. Abscheidung verschiedener ausgewählter Reflektor Schichtsysteme auf Standard Aluminium Substrat .....	23
6. Charakterisierung der Reflektor Schichtsysteme .....	24
7. Optimierung Reflektormaterial für die Montage mittels Klebetechnik .....	26
8. Abscheidung verschiedener ausgewählter Reflektor Schichtsysteme auf alternativen Substraten.....	30
9. Optimierung Schutzschicht.....	32
10. Messung der optischen Reflexionseigenschaften/Benchmarking .....	45

# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	12.02.16	Reinhard Dasbach	Übersicht Patentrecherche
2	29.06.18	Reinhard Dasbach	Almecco Ergebnisse eingefügt
3	20.07.18	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung
4	13.07.18	Reinhard Dasbach	Überarbeitung
5			
6			

Tabelle 1: Dokumenthistorie

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert die Ergebnisse des AP 1.3, das im Rahmen des Teilvorhabens „Entwicklung eines hochreflektierenden Solarreflektormaterials auf Metallsubstrat“ von der Almecco GmbH und vom DLR durchgeführt wurde.

In Kombination mit der Betonkollektorschale ist der Einsatz eines flexiblen Spiegels sinnvoll. Im Projekt wurden Spiegel auf Basis eines Aluminiumcoils untersucht. Zunächst wurden dafür die Anforderungen bestimmt. Für konzentrierende Solarsysteme sind eine hohe gerichtete Reflektivität des solaren Spektrums, Formgenauigkeit, lange Haltbarkeit und geringe Kosten wichtig.

Es wurden auf Basis erster Optimierungsschritte mit einem optischen Simulationsprogramm verschiedene Schichtsysteme auf Aluminiumsubstrat entwickelt und mit Degradationstests eine Vorprüfung und Bewertung der Schichtsysteme vorgenommen. Insbesondere mit neuen Sol-Gel Schichtsystemen konnten gute Ergebnisse erzielt werden.

Aussichtsreiche Schichtsysteme wurden ausführlichen Degradations- und Abrasionstests unterzogen. Die Ergebnisse sind dann in die Entwicklung weiterer Schichtsysteme eingeflossen. Im AP 1.4 sind die erreichten Parameter für Reflexion und Degradation dargestellt.

Es wurden Versuche auf einer industriellen Bandlaminierungsanlage durchgeführt bei denen das Klebeband auf die Rückseite von 1200mm breitem und 0,4mm dickem Aluminiumspiegelmaterial auflaminiert wurde. Das Klebeband konnte plan aufgebracht werden und weist eine gute Haftung auf dem Aluminiummaterial auf. Dieses Spiegelmaterial wurde auf die Parabolrinne des Demonstrators aufgebracht.

## 2.1 Arbeitsziel

Ziel ist es, eine Reflektorbeschichtung für Metallblech zu entwickeln, die ähnliche optische Kennwerte wie Dünnglasspiegel besitzt und die wesentlich stabiler gegen Umwelteinflüsse ist, wie die bisher hergestellten Schichtsysteme für Solarreflektoren auf Metallblechen. Diese muss auch unter abrasivem und korrosivem Angriff ihr hohes Reflexionsvermögen erhalten, um die Leistung des Kollektor-Systems über die Lebensdauer von mindestens 10 Jahren gewährleisten zu können.

Zudem sollen die Reflektorbleche für die Montage und den Einsatz in den von den Projektpartnern zu entwickelnden Parabolrinnensystemen auf Betonbasis optimiert werden.

## 2.2 Schnittstellen

Die Aufgaben im Arbeitspaket AP 1.3 stehen in Wechselwirkung mit den Arbeitspaketen 1.1.1 (Betontechnik) und 1.1.2 (Klebertechnik) und liefert Grundlagen zur Fertigung des Demo-Moduls (Arbeitspaket 4). Die in Arbeitspaketes AP 1.3 hergestellten Aluminiumspiegel werden im AP1.4 Qualitätssicherung und Langzeittests durch das DLR getestet und bewertet, um ein geeignetes Schichtsystem auszuwählen. Daneben liefern die in AP1.3 durchgeführten Beschichtungsversuche an der industriellen Beschichtungsanlage die Daten für die Kostenkalkulation des Spiegelmaterials, die in AP 5 (Kostenanalyse und Zukunftskonzepte) zur Kalkulation des Gesamtsystems benötigt werden.

## 3. Lastenheft Metallreflektor

Als erster Meilenstein des Arbeitspaketes ist die Erstellung eines Lastenheftes für den zu entwickelnden Metallreflektor durch das DLR vorgesehen. Im Folgenden sind grundlegende Anforderungen an den Reflektor zusammengefasst.

### Lastenheft Metallreflektor:

Wichtigste Parameter für die Reflektormaterialien sind:

- Reflexionsgrad
- Haltbarkeit
- Preis
- Klebbarkeit
- Formgenauigkeit

Beim Reflexionsgrad gilt es zwischen verschiedenen Parametern zu unterscheiden. Die im CSP-Bereich typischen Parameter sind im Folgenden erläutert. Der spektrale hemisphärische Reflexionsgrad,  $\rho_h(280-2500nm, 8^\circ, h)$ , gibt an wieviel Strahlung in den gesamten Halbraum zurückreflektiert wird, gemessen im Wellenlängenbereich von 280 – 2500 nm unter einem Einfallswinkel von  $8^\circ$ . Für den solargewichteten hemisphärischen Reflexionsgrad,

$\rho_h(\text{SW}, 8^\circ, h)$ , wird dieser mit dem Sonnenspektrum gewichtet (standardmäßig ASTM G173-03). Der monochromatische direkte Reflexionsgrad,  $\rho_s(660\text{nm}, 15^\circ, 12,5\text{mrad})$ , gibt an wieviel Strahlung gerichtet reflektiert wird mit einem, für Parabolrinnenkollektoren adäquaten, Akzeptanzwinkel von 12,5 mrad. Einfallswinkel ist hier  $15^\circ$  und gemessen wird bei einer Wellenlänge von 660 nm. Zu weiteren Details siehe auch die SolarPaces Reflectance Guideline (<http://www.solarpaces.org/tasks/task-iii-solar-technology-and-advanced-applications/reflectance-measurement-guideline>).

Die bisher verfügbaren Reflektoren auf Aluminiumbasis erzielen Werte von unter 85% gerichtetem Reflexionsgrad (solar gewichteter hemisphärischer Reflexionsgrad <90%). Diese Werte müssen von dem neuen Material deutlich überboten werden. Referenzwert ist dabei ein Dünnglasspiegel (Dicke 1 mm) der Werte an die 96 % gerichteter Reflexionsgrad (ähnlich solar gewichtet hemisphärisch) erzielt.

Eine Lebensdauer der Reflektoren von 10 Jahren ist das absolute Minimum damit der Einsatz kommerziell sinnvoll sein kann. Im Idealfall wird der oben geforderte Reflexionsgrad über eine Lebensdauer von 30 Jahren gehalten. Die Reflektoren werden mit einer Prozedur getestet, die den Außeneinsatz an einem aggressiven Küstenstandort für 3 beziehungsweise 10 Jahre simuliert. Herkömmliche Aluminiumreflektoren zeigten in diesen Tests einen deutlichen Abfall des gerichteten Reflexionsgrades von je nach Material 2-9% nach drei Jahren und 9-30% nach 10 Jahren. Diese Werte müssen von dem neuen Material deutlich übertroffen werden.

In der Materials Roadmap (SEC(2011)1609) der EU wird als Kostenreduktionsziel eine 25% Senkung gegenüber den Preisen von 2010 gesetzt (bei einem angesetzten Preis für Glasspiegel 2010 von 25 €/m<sup>2</sup> wären das 18,75 €/m<sup>2</sup>). Kommerzielle Dickglasspiegel sind heutzutage bereits ab 16€/m<sup>2</sup> erhältlich.

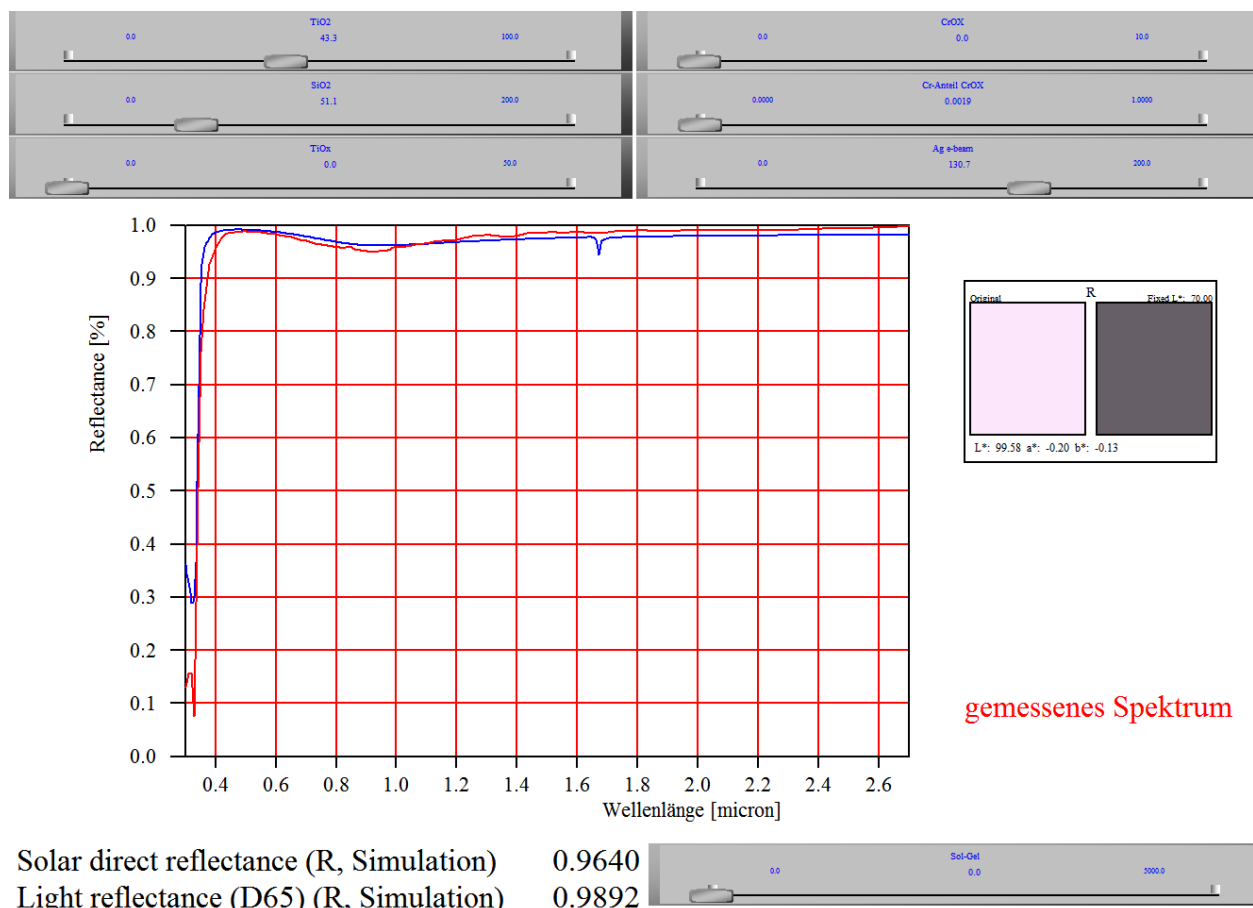
Weiterhin muss gewährleistet sein, dass die Reflektorrückseite so beschaffen ist, dass das Material mit dem Kollektor verklebt werden kann. Möglich wäre auch eine direkte Verbindung mit dem Beton.

Die Formgenauigkeit ergibt sich vor allem durch die Verbindung des Reflektors mit der Rückstruktur und wird deswegen in diesem Heft, das lediglich den Metallreflektor selbst betrifft, nicht definiert.

## Optische Simulation der Schichtsysteme

Die optischen Eigenschaften der ausgewählten Schichtsysteme wurden mittels des optischen Simulationsprogramms „CODE“ [The05] simuliert und optimiert. Dabei werden nur optisch aktive Schichten oberhalb der Silberschicht berücksichtigt. Die Dicke der Silberschicht wird stets so groß gewählt, dass sie optisch dicht ist, d.h. dass keine elektromagnetische Strahlung die Silberschicht durchdringt und somit mit den darunterliegenden Schichten interagieren kann. Aus den Simulationen ist bekannt, dass die Silberschicht mindestens 100nm dick sein muss, um diese Bedingung zu erfüllen. Auch nur dann wird die maximale Reflexion erreicht. Ein Vergleich mit dem gemessenen Spektrum (rot) der silberbasierten Reflexionsschicht für Beleuchtungszwecke und dem simulierten Spektrum (blau) zeigt die Leistungsfähigkeit des Modells (siehe Grafik 1)

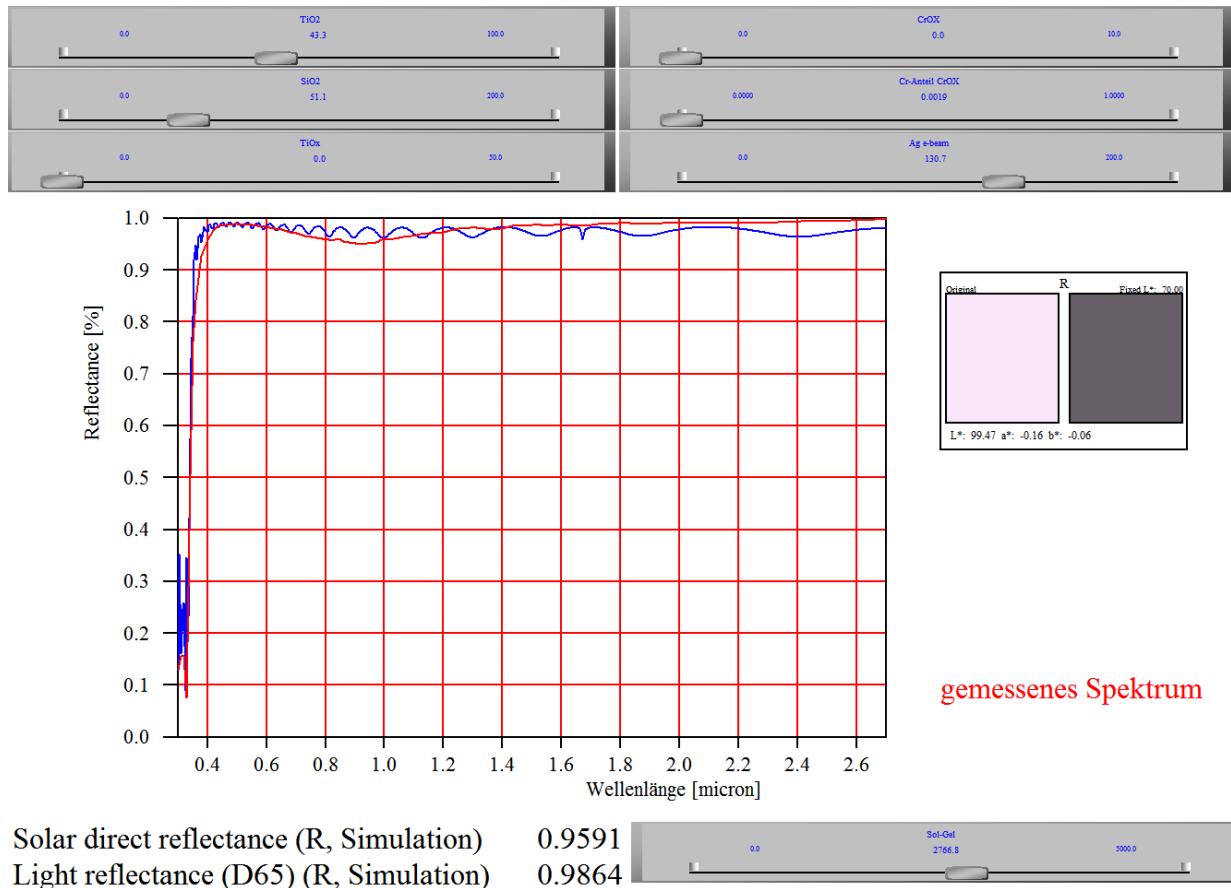
Daneben zeigt das Model, dass ohne Sol-Gel Schicht theoretisch eine solare Reflexion von über 96% erreichbar ist.



Grafik 1: Oberfläche des "CODE" Modells für die optische Simulation der Schichtsysteme

Wird in der Simulation zusätzlich SiO<sub>2</sub> Schicht, die der Sol-Gel Schutzschicht entsprechen soll) angenommen, wird die solare Reflexion durch die auftretenden Interferenzen etwas reduziert, jedoch nicht so stark wie bei realen Sol-Gel Schichten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Auch die Variation der Schichtdicke der simulierten SiO<sub>2</sub> Schutzschicht in weiten Bereichen 2 – 5µm hat keinen wesentlichen Einfluss auf die solare Reflexion. Daraus kann geschlossen werden, dass in realen Sol-Gel Schichten noch Absorp-

tion auftritt. Hier besteht also noch Verbesserungspotential für die Sol-Gel Zusammensetzung und Abscheidung.



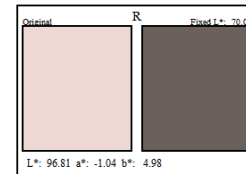
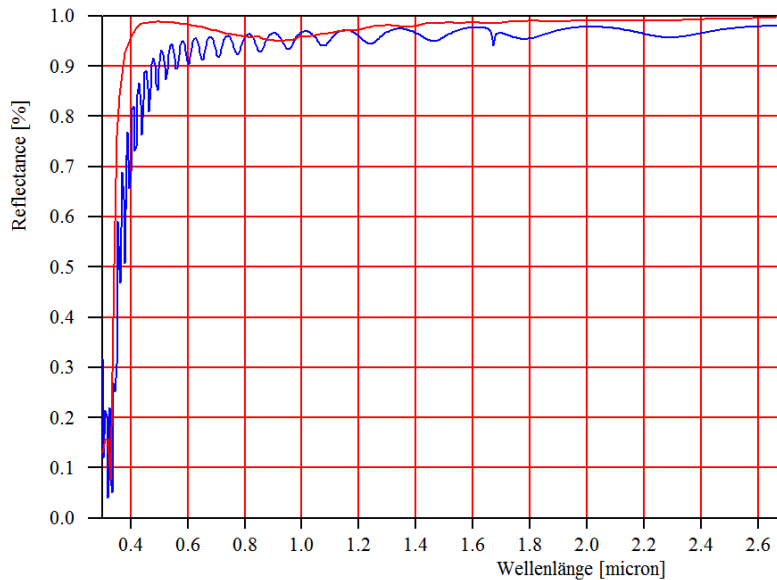
Grafik 2: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit einer  $\text{SiO}_2$  Schutzschicht.

Für die Simulation von weiteren Schichten zwischen Silberschicht und LI-HI Schichtsystem wurde "Effektiv-Medien-Theorie" verwendet, u. a. das Bruggeman Modell, um die Zusammensetzung von reaktiv gesputterten Schichten simulieren zu können.

Aus den Simulationen konnte geschlossen werden, dass die Silberschutzschichten nicht zu dick sein dürfen, um nicht die Reflexion signifikant zu reduzieren. Z. b. wird durch eine 10nm dicke CrOx Schicht die Reflexion schon um über 1% reduziert. Falls diese Schicht nicht stöchiometrisch ist, sinkt die Reflexion schon um mehrere Prozent ab (siehe Grafik 3). Daher müssen die Abscheidebedingungen für diese Schichten genau kontrolliert werden.

Z. B. kann eine TiOx Schicht wesentlich dicker sein, um die Reflexion um den gleichen Betrag zu reduzieren (siehe Grafik 4). Ob diese Schicht dann auch einen effektiveren Korrosionsschutz bietet, muss in den geplanten Versuchen untersucht werden.

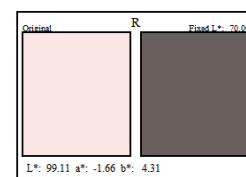
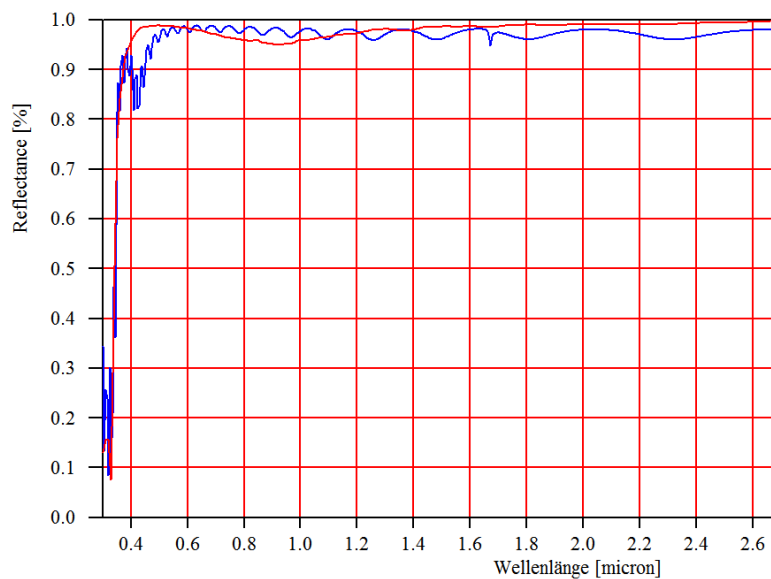
In den geplanten Abscheidungsversuchen muss somit die optimale Kombination aus Schutz der Silberschicht und den optischen Eigenschaften des Schichtsystems gefunden werden.



gemessenes Spektrum

Solar direct reflectance (R, Simulation) 0.9005  
Light reflectance (D65) (R, Simulation) 0.9199

Grafik 3: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit CrOx Silberschutzschicht



gemessenes Spektrum

Solar direct reflectance (R, Simulation) 0.9517  
Light reflectance (D65) (R, Simulation) 0.9771

Grafik 4: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit TiOx Silberschutzschicht



## 4. Auswertung der Alumir Ergebnisse und Simulation optimierter Schichtsysteme

Das Ziel des Alumir Projektes war es, verschieden hergestellte Aluminiumspiegel für CSP-Systeme an Küstennahen, gemäßigten (extrem trocken und seltener Sandsturm) und extremen Wüstenstandorten (häufiger Sandsturm) über 3 Jahre zu exponieren und die Degradationsmechanismen zu identifizieren, um daraus Strategien für eine Optimierung von PVD beschichteten Aluminiumspiegeln abzuleiten.

Während der dreijährigen Exposition der verschiedenen Spiegelschichten wurden 5 Hauptdegradationsmechanismen identifiziert (siehe Bild 1.3.1):

- 1) PVD-Schicht Korrosion (PVD-layer corrosion)
- 2) Micropitting innerhalb der PVD Schichten (nicht beim Almeco Spiegelsystemen)
- 3) Lochfraßkorrosion
- 4) Ablagerungen auf der Spiegeloberfläche (Soiling)
- 5) Abrasion durch Sandsturm

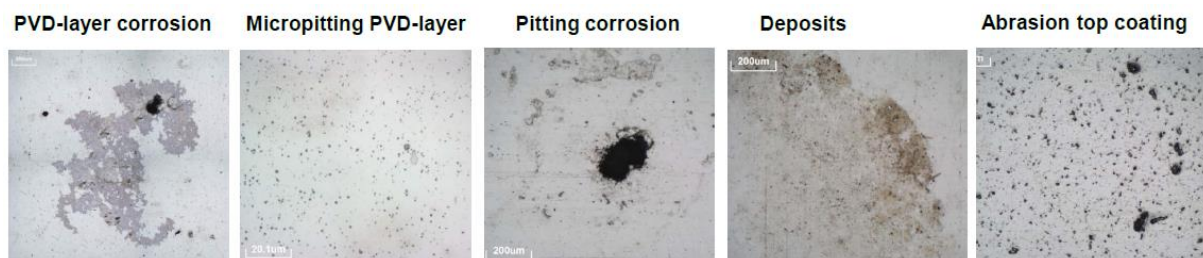


Bild 1.3.1: Typische Degradationserscheinungen von Aluminiumspiegeln nach Exposition

Daneben wurde versucht die Degradationsmechanismen im Labor zu simulieren und beschleunigte Tests daraus abzuleiten. Letztendlich wurden drei verschiedene Kombinationen von Labortests für die drei verschiedenen Standorttypen entwickelt, die die bei der Exposition über drei Jahre beobachtete Degradation relativ gut simulieren (siehe Tabelle 1.3.1). Daneben wurde auch eine beschleunigte Prozedur entwickelt, die die Degradation über einen Zeitraum von 10 Jahren simulieren soll (siehe <http://www.solarpaces.org/tasks/task-iii-solar-technology-and-advanced-applications/reflectance-measurement-guideline>).

	Years	CASS (h)	Abrasion (g)	CASS (h)	UV/Hum (h)
Extreme Desert	3	-	180	2	480
	10	-	600	8	480
Desert	3	-	5	8	480
	10	-	15	24	480
Coastal	3	96	5	8	480
	10	312	15	24	480

Tabelle 1.3.1: Beschleunigte Tests für verschiedene Standorttypen

Damit steht ein beschleunigter Degradationstest zur Verfügung, um das Langzeitverhalten von Spiegelschichten im Außeneinsatz an verschiedenen Standorttypen beurteilen zu können.

Somit konnte dieser Test dazu genutzt werden, die im Rahmen des ConSol Projektes entwickelnden Spiegelbeschichtungen zu bewerten.

### Bisher verwendete Spiegelschichten

Die bisher von Almeco hergestellten Solarreflektorbeschichtungen, die im Rahmen des Alimir Projektes getestet wurden, sind wie folgt aufgebaut:

Als Substrat wird Aluminium mit Standard Reinheit (Al 1050) verwendet, auf das einseitig Aluminium höherer Reinheit (Al1080) beim Aluminiumlieferanten walzplattiert wird. Dies ist notwendig, damit es beim anschließenden elektrochemischen Polieren der Oberfläche nicht zu Lochkorrosion durch Verunreinigungen im Aluminium kommt. Die walzplattierte Oberfläche wird im letzten Arbeitsgang mit einer spiegelpolierten Walze endgewalzt, so dass diese Seite schon eine spiegelnde Oberfläche aufweist. Allerdings sind noch immer leichte Walzriefen vom letzten Walzschrift auf dieser Oberfläche vorhanden.

Um später eine homogene gerichtete Reflexion gewährleisten zu können, muss diese Oberfläche vor der PVD Beschichtung noch elektrochemisch in einer Bandanodisierungsanlage vorbehandelt werden (siehe Bild 1.3.2):

Der erste Arbeitsschritt nach dem Entfetten ist die elektrochemische Politur der Oberfläche. Die elektrochemisch polierte Oberfläche ist mechanisch sehr empfindlich und wird daher mit einer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schutzschicht, die durch Anodisieren aufgebracht wird, geschützt. Diese Oberfläche ist allerdings sehr porös (siehe AP 1.3.4 ). Um diese Oberfläche mittels PVD-Verfahren beschichten zu können, wird diese in einem letzten Arbeitsschritt versiegelt.

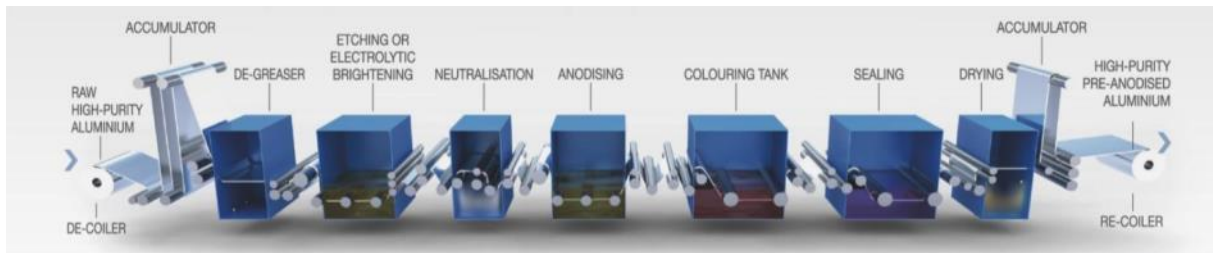
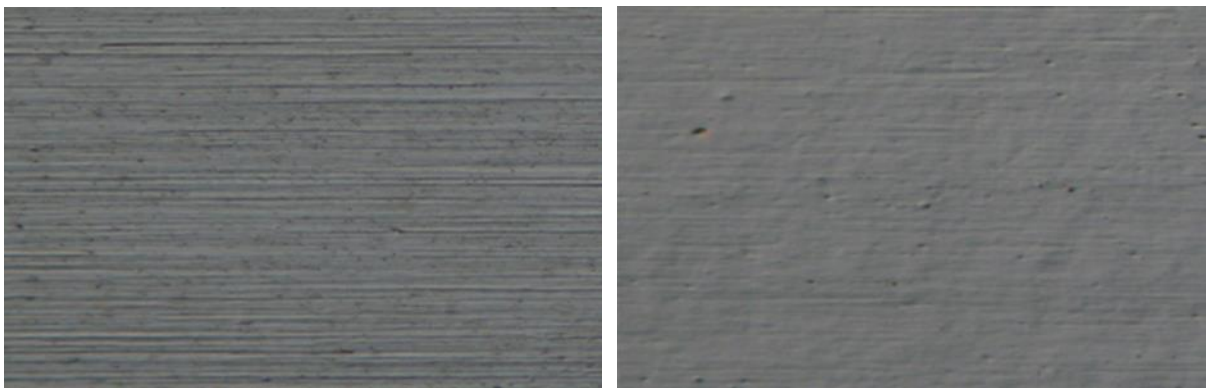


Bild 1.3.2: Schema einer Bandanodisierungsanlage

In Bild 1.3.3 ist die Aluminiumoberfläche nach dem letzten Walzschritt und nach der elektrochemischen Politur und Anodisierung gezeigt.



Spiegelnd gewalzte Aluminiumoberfläche

elektrochemisch polierte und anodisierte Aluminiumoberfläche (X100 Vergrößerung)

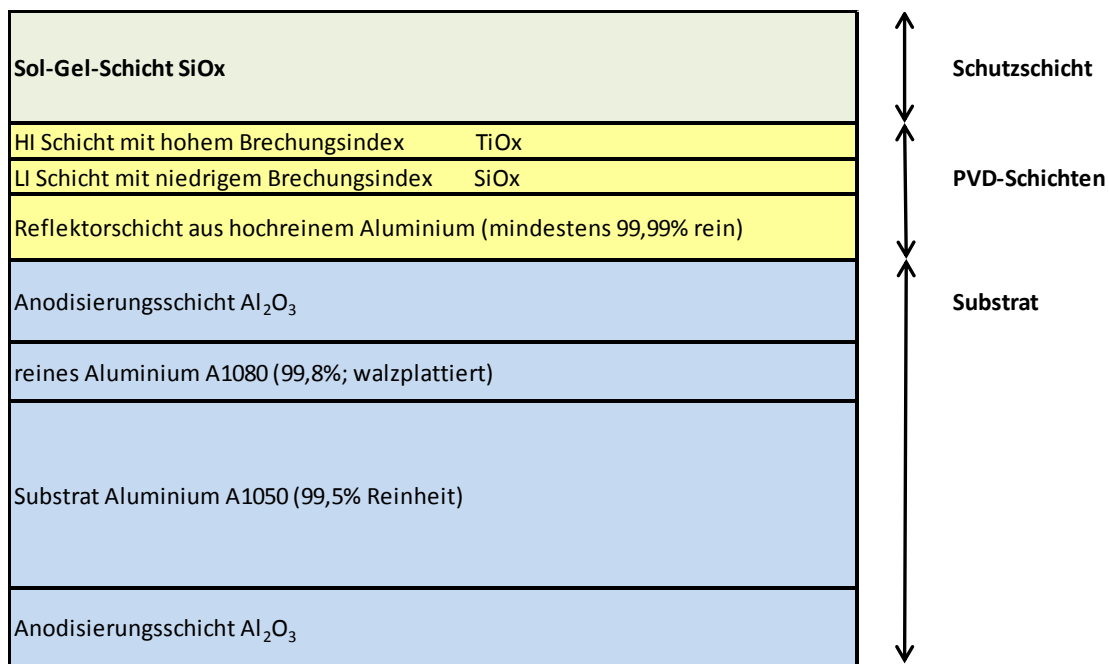
Bild 1.3.3: Aluminiumoberfläche vor und nach der elektrochemischen Politur

Um eine hohe gerichtete Reflexion zu erhalten, müssen die so vorbereiteten Aluminiumbleche anschließend mittels PVD-Verfahren beschichtet werden.

Dazu wird zunächst eine hochreine Aluminiumschicht (99,99% rein) mit hoher intrinsischer Reflexion aufgedampft. Um die Reflexion noch zu erhöhen, wird ein reflexionsverstärkendes Wechselschichtsystem aus einem niedrigbrechenden Material (LI Schicht) und einem hochbrechenden Material (HI Schicht) aufgedampft. In diesem Fall wurde Siliziumdioxid und Titandioxid verwendet. Die Schichtdicken dieser Schichten sind dabei so berechnet, dass es zu einer positiven Interferenz kommt, die die Reflexion der metallischen Reflektorschicht noch weiter erhöht.

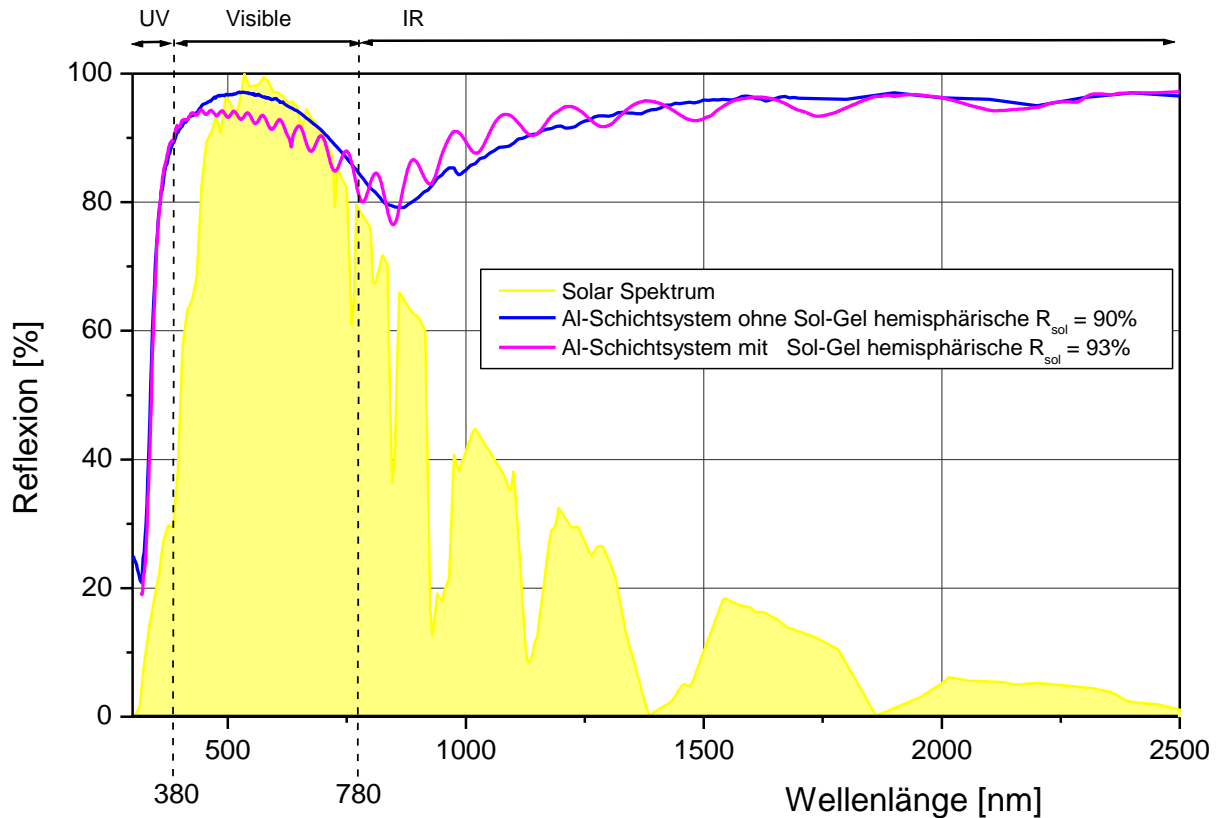
Dieses Schichtsystem weist eine solare Reflexion von etwa 93% auf. Allerdings ist dieses Schichtsystem nicht für den Außeneinsatz geeignet, obwohl das Wechselschichtsystem die Aluminiumschicht im Normalfall gut gegen korrosiven Angriff schützt.

Um das PVD Spiegelschichtsystem zusätzlich zu schützen, wird in einem anschließenden nasschemischen Verfahren eine Sol-Gel basierte SiOx Schicht mit einer Dicke von etwa 3µm aufgebracht. In der Grafik 1.3.1 ist der schematische Aufbau der getesteten Spiegel gezeigt:



Grafik 1.3.1: Schematische Darstellung der bisher verwendeten Aluminiumspiegel

Durch das Aufbringen der Sol-Gel Schicht kommt es zu Interferenzerscheinungen, so dass die hemisphärische solar gewichtete Reflexion auf etwa 90% reduziert wird. In der Grafik 1.3.2 ist das Reflexionsspektrum mit und ohne Sol-Gel Schutzschicht aufgetragen.



Grafik 1.3.2: Reflexionsspektren einer Aluminium basierten Reflektorschicht mit und ohne Sol-Gel Schutzschicht

### 1) PVD-Schicht Korrosion (PVD-layer corrosion)

Für die geplante Optimierung von Spiegelschichtsystemen war es besonders wichtig, die Korrosion der PVD-Schichten genauer zu untersuchen. Dazu wurden vom DLR REM und TEM Bilder der betroffenen Stellen angefertigt.

In Bild 1.3.4 ist zu erkennen, dass die Korrosion durch Defekte in der Sol-Gel Beschichtung induziert wird: Um einen Defekt kommt es zur Korrosion der Aluminium – Spiegelschicht (dunkler Bereich um den Defekt, da an dieser Stelle Feuchtigkeit in das Schichtsystem eindringen kann. Im TEM Bild ist auf der rechten Seite zu erkennen (dunkler Bereich), dass sich die Aluminiumspiegelschicht aufgelöst hat. Die SiOx und TiOx Schicht ist allerdings noch vorhanden! Eine Wasserstoffblase neben dem Defekt gibt einen Hinweis auf den Degradationsmechanismus (in der Grafik 1.3.3 schematisch dargestellt). Aluminium reagiert mit Wasser zu Aluminiumhydroxid unter der Abgabe von Wasserstoff. Dieser Wasserstoff bildet Bläschen, die letztendlich weitere Risse im Schichtsystem verursachen, so dass noch mehr Feuchtigkeit bis zum PVD-Schichtsystem vordringen kann.

## Classic corrosion of PVD reflectors

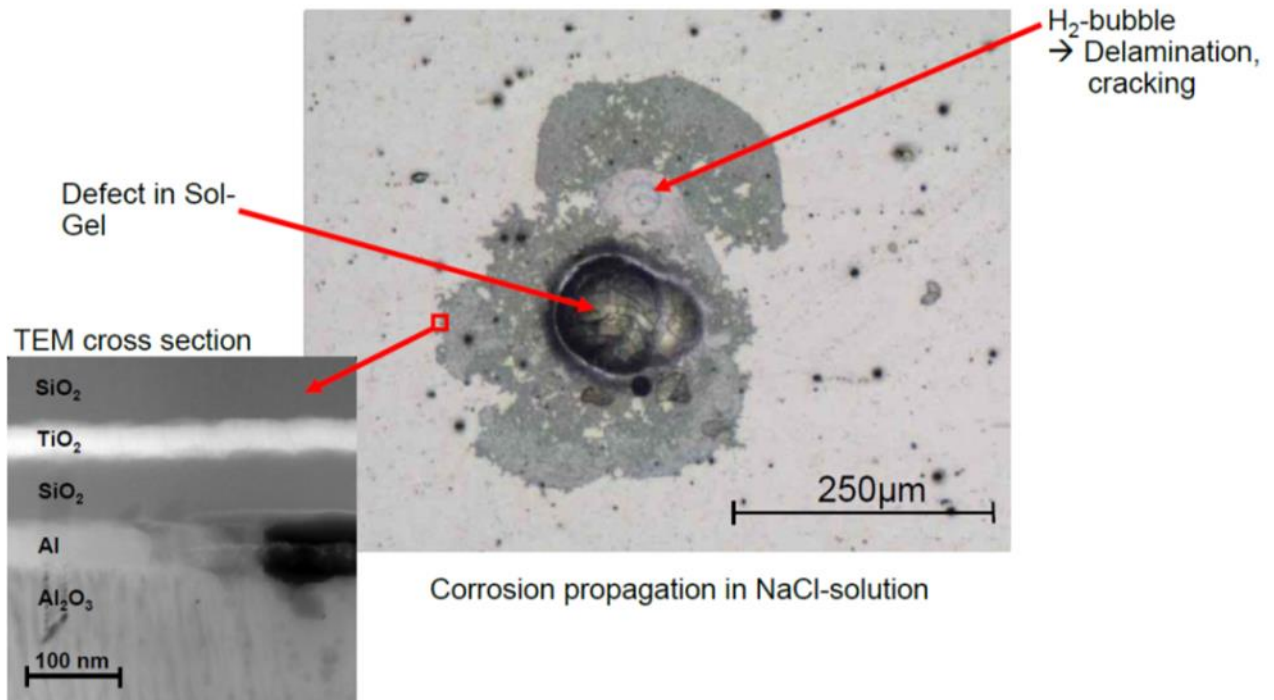
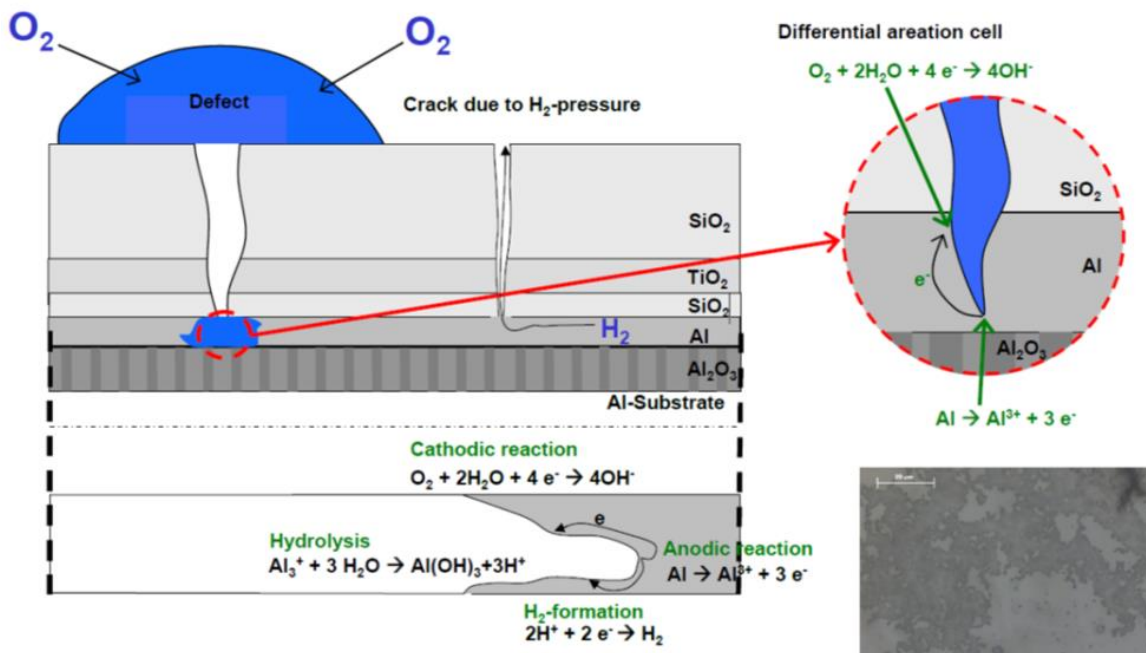


Bild 1: REM Bild eines Oberflächendefektes (rechts) und TEM Querschnitt der PVD-Schichten (links)

## Classic corrosion of PVD reflectors



Grafik 1.3.3: Modell der Korrosion des PVD-Schichtsystems

Die Defekte in der Sol-Gel Deckschicht werden hauptsächlich durch Sandsturm hervorgerufen, insofern sie nicht schon während der Beschichtung oder Montage verursacht wurden.

Aus diesen Untersuchungen kann geschlossen werden, dass zum einen die Sol-Gel Schutzschicht so optimiert werden muss, dass sie resistenter gegen mechanische Beschädigungen wird. Zum anderen muss die metallische Spiegelschicht besser vor Korrosionsangriff geschützt werden, wenn die Schutzschichten beschädigt sind und Feuchtigkeit zu ihr vordringen kann.

## **2) Micropitting innerhalb der PVD Schichten (nicht beim Almeco Spiegelsystemen)**

Bei einigen im Alumir Projekt untersuchten Spiegelschichtsystemen ist eine Lochfraßkorrosion innerhalb des PVD Schichtsystems aufgetreten. Eine mögliche Ursache kann eine zu große Differenz im elektrochemischen Potential der verwendeten Materialien der Einzelschichten sein.

Bei dem von Almeco bisher hergestellten Aluminium basierten Schichtsystem wurde dieser Korrosionsmechanismus zwar nicht festgestellt, doch muss er bei der Entwicklung von neuen Schichtsystemen berücksichtigt werden.

## **3) Lochfraßkorrosion**

In besonders korrosiven Umgebungen z. B. in Meeresnähe kam es zu Lochfraßkorrosion auf der Spiegelseite. In Extremfällen wurde beobachtet, dass die Korrosion durch das Substrat hindurch die Spiegelbeschichtung zerstörte. Somit muss auch der Schutz der Rückseite vor Korrosion bei der Entwicklung von neuen Aluminiumspiegeln berücksichtigt werden.

Somit muss untersucht werden, ob das verwendete Klebesystem einen ausreichenden Korrosionsschutz für die Aluminiumrückseite gewährleistet.

## **4) Ablagerungen auf der Spiegeloberfläche (soiling)**

Es wurde beobachtet, dass sich Schmutzschichten und Schichten aus organischem Material auf der Oberfläche der verwendeten Sol-Gel bzw. Lackschichten leicht festsetzen (sogenanntes „soiling“), was zu einer signifikanten Abnahme der Reflexion (insbesondere der gerichteten Reflexion) führte. Dies macht eine häufige Reinigung der Spiegeloberfläche nötig und erhöht somit die Betriebskosten eines Solarkraftwerks.

## **5) Abrasion durch Sandsturm**

In Gebieten mit häufigem Auftreten von Sandstürmen ist die Schädigung der Spiegeloberfläche durch einschlagende Sandkörner der dominierende Degradationsfaktor.

## **Optimierung Aluminiumspiegel im Rahmen des ConSol Projektes**

Nach Auswertung des Alumir Projektes kann generell festgestellt werden, dass die Degradation bei Aluminiumspiegeln deutlich schneller abläuft wie im Fall von Glasspiegeln, die der-

zeit für Solarthermische Kraftwerke eingesetzt werden. Hauptsächlich werden dabei Rückseitenspiegel mit einer Silberbeschichtung verwendet, bei der die Solarstrahlung durch das Glas läuft und durch eine Spiegelbeschichtung auf Rückseite des Glases reflektiert wird. Diese Spiegel erreichen eine solare Reflexion von etwa 95%.

Neben der geringeren Resistenz gegen Umwelteinflüsse weisen die bisher verwendeten Aluminiumspiegel somit eine etwa 5% geringere solare Reflexion wie Glasspiegel auf.

Ziel des Projektes war es daher, eine Reflektorbeschichtung für Metallblech zu entwickeln, die ähnliche optische Kennwerte wie Glasspiegel besitzt und die wesentlich stabiler gegen Umwelteinflüsse ist, wie die bisher hergestellten Schichtsysteme. Damit ergeben sich folgende Punkte, die bei bisher hergestellten Spiegeln auf Aluminiumsubstrat verbessert werden mussten:

- 1.) Reduktion der Degradation des PVD Schichtsystems durch Umwelteinflüsse.
- 2.) Ersetzen der Aluminiumspiegelschicht durch eine Silberspiegelschicht zur Erhöhung der solaren Reflexion. Erarbeitung von Strategien zum Schutz der Silberschicht.
- 3.) Optimierung der Schutzschicht für das PVD Schichtsystem hinsichtlich der Pinhole Dichte und Erhöhung der Resistenz gegen mechanische Beschädigungen.
- 4.) Optimierung der Oberfläche der Schutzschicht durch eine anti-soiling Beschichtung
- 5.) Schutz der Substratrückseite vor Korrosion in Zusammenarbeit mit der Klebtechnik im Rahmen des Projektes

### **1) Optimierung des PVD Schichtsystems**

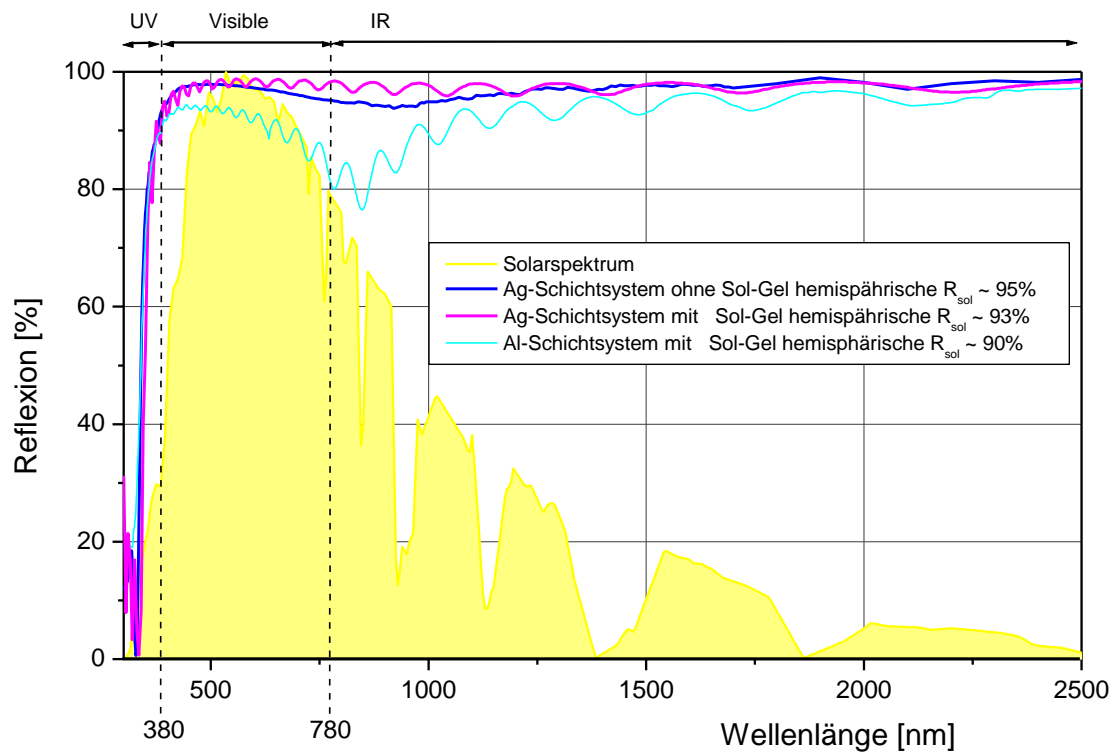
Um eine hohe Reflexion zu erreichen, sind PVD Spiegelschichten in der Regel aus mindestens 3 Funktionsschichten aufgebaut: Einer metallischen Reflexionsschicht mit möglichst hoher intrinsischer Reflexion - in der Regel Aluminium oder Silber - und einem reflexionserhöhendem Li-HI Wechselschichtsystem aus transparenten dielektrischen Materialien (siehe Grafik 1.3.1).

Dieses funktionelle Reflexionsschichtsystem aus Reflektorschicht und reflexionserhöhendem LI/HI Wechselschichtsystem gilt es vor Degradationsmechanismen wie Oxidation, Diffusion und Agglomeration sowie Korrosion zu schützen.

Um die gewünschte hohe solare Reflexion zu erhalten, muss die bisher verwendete Aluminiumschicht durch eine Silberschicht ersetzt werden. Dabei führt der Einsatz von Silber als Reflektorschicht zu einem noch höheren Korrosionsrisiko.

Es wurde versucht, ein für die Beleuchtungsindustrie entwickeltes Schichtsystem mit einer Haftschrift aus TiO<sub>x</sub> und Cu, einer Reflektorschicht aus Silber und einem LI-HI Wechselschichtsystem aus SiO<sub>x</sub>-TiO<sub>x</sub> mit einer Sol-Gel Schicht zu schützen. Dieses Schichtsystem weist eine hemisphärische solar gewichtete Reflexion von 95% auf. Allerdings reduziert sich die solar gewichtete Reflexion auf 93% nach Aufbringen einer 2-3µm dicken Sol-Gel Schutzschicht (siehe Grafik 1.3.4). Im Vergleich zu Aluminium basierten Schichtsystemen mit Sol-Gel Schutzschicht konnte durch die Verwendung von Silber die hemisphärische solar gewichtete Reflexion um etwa 3% erhöht werden.





Grafik 1.3.4: Vergleich des Reflexionsspektrums einer Ag-basierten Spiegelbeschichtung mit und ohne Sol-Gel Schutzsystem.

Dieses Schichtsystem war erwartungsgemäß wesentlich weniger korrosionsstabil wie das Schichtsystem mit Aluminiumreflektorschicht. Nach 24h NSS kam es zur partiellen Delaminierung der Schicht und zu Korrosionserscheinungen.

Daher sollte durch das Einbringen verschiedener weiterer Schichten sowohl unterhalb wie auch oberhalb der Reflektorschicht aus Silber diese besser vor korrosivem Angriff geschützt werden. Diese Schichten mussten so ausgewählt werden, dass sie zum einen Ihre Funktion als Schutzschicht erfüllen und zum anderen nicht die Reflexion des Gesamtschichtsystems reduzieren.

## Literaturrecherche

Aus der Literatur ist bekannt, dass Silberschichten unter Umwelteinflüssen schnell degradieren. Es kommt zu Reaktionen mit Luftschadstoffen wie z. B. Schwefel oder besonders unter Temperatureinfluss zu Agglomeration der Silberschicht. Damit sind unterhalb und oberhalb der Silberschicht weitere Schichten einzufügen, mit denen das Silber fixiert und gleichzeitig vor Umwelteinflüssen geschützt wird.

Um geeignete Schutzschichtsysteme zu identifizieren, wurde eine Literatur und Patentrecherche durchgeführt.

Bisher werden Silberschichten hauptsächlich in low-E-Beschichtungen für Fensterglas, für Spiegel für die Autoindustrie oder für Teleskope, für Solarspiegel auf Glassubstrat und als Infrarotspiegel in selektiven Solarabsorberbeschichtungen verwendet.

Besonders für low-E-Beschichtungen müssen die Schutzschichten für Silber besonders effektiv vor Oxidation, Agglomeration und Diffusionsprozessen schützen, da hier die Silberschichten sehr dünn sein müssen, um noch transparent für sichtbares Licht zu sein. Daher gibt es hier schon eine Vielzahl von Patenten, die verschiedene Schutzschichtsystemen beanspruchen (siehe Tabelle im Anhang).

LUZ Industries beansprucht in der US 5,019,458 Solarspiegel mit einer solaren Reflexion von 95,5% auf einem Glassubstrat, bei der die Reflektorschicht aus Silber zwischen eine Schicht aus NiCr und ZnS eingebettet ist. Bei einer Lagerung im Klimaschrank über eine Woche bei 95-100% RH; 140°F (60°C) habe sich die Reflexion nicht signifikant geändert.

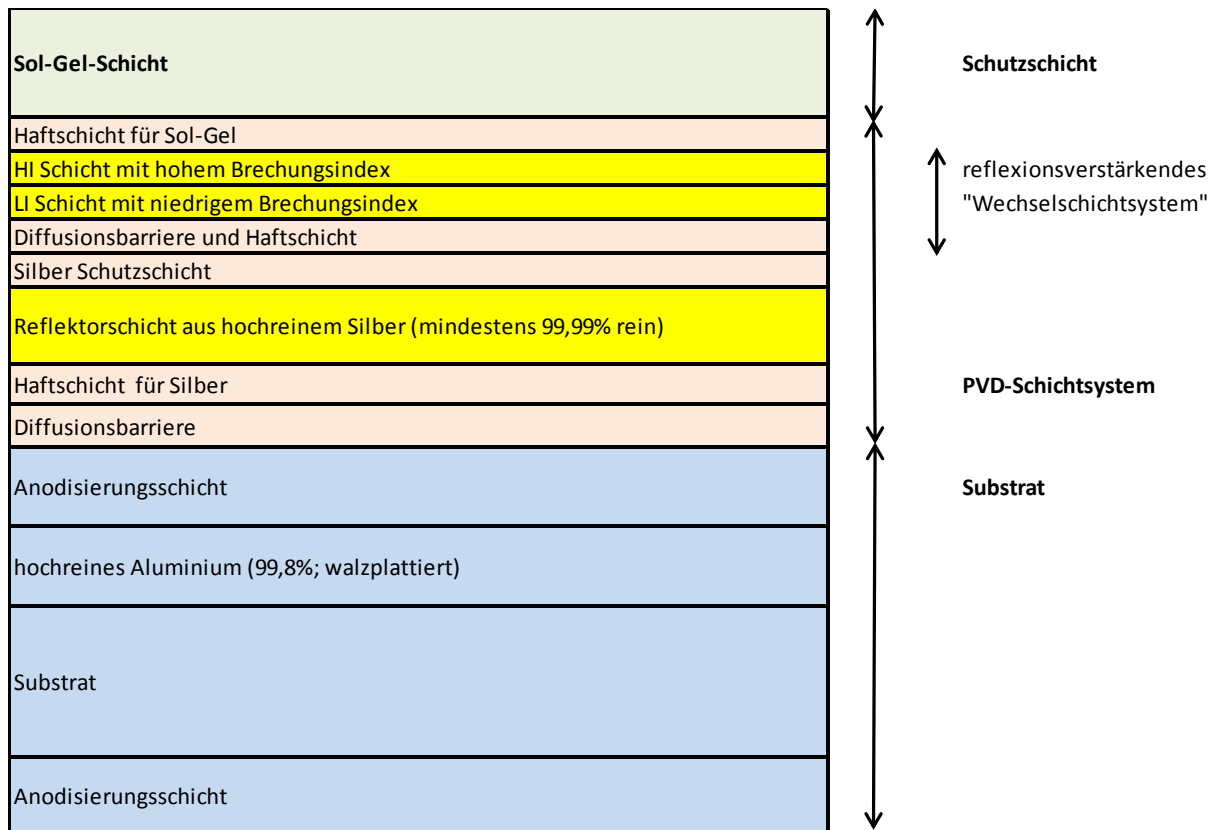
Die DE 10 2005 000 911 A1 beansprucht ein "umweltbeständiges Spiegelschichtsystem mit hohem Reflexionsvermögen im sichtbaren Spektralbereich zur Abscheidung auf "dielektrischen Substraten" zum Einsatz in LCD- oder DLP-Projektoren. Die Spiegelschicht aus Silber wird zwischen zwei ZnOx Schichten eingebettet und dann mit einem zweifachen LI-HI Schichtsystem aus SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> beschichtet.

Die US 6,078,425 A beansprucht ein silberbasiertes Spiegelsystem für Teleskope. Hier wird die Spiegelschicht aus Silber zwischen zwei Ni-CrN Schichten eingebettet und anschließend mit einem LI-HI Schichtsystem versehen.

In der Dissertation „Hochtemperaturstabile Absorberschichten für linear konzentrierende solarthermische Kraftwerke“ von Christina Hildebrandt werden als Schutzschichten für eine Infrarot Reflektorschicht aus Silber Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrOx, TiOx und NiCrOx untersucht.

In der Dissertation „Herstellung von Spiegelschichtsystemen auf der Basis von Aluminium oder Silber für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik“ von Jorg Krujatz wird ein AlSiN-TiO<sub>2</sub> Schichtsystem als Schutz für Silber vorgeschlagen.

Nach Auswertung der Literatur wurde beschlossen, ein Reflektorschichtsystem mit einer Diffusionsbarriereschicht und einer Haftschrift für Silber, die außerdem die Agglomeration von Silber verhindern soll, unterhalb der Silberschicht und einer Silberschutzschicht und einer Diffusionsbarriereschicht zwischen Silberschicht und LI-HI-Wechselschichtsystem herzustellen. Optional sollte noch eine PVD Schicht oberhalb des LI-HI Schichtsystems abgeschieden werden, um die Haftung der Sol-Gel Schicht zu verbessern (siehe Grafik 1.3.5).



Grafik 1.3.5: Schematische Darstellung eines Schichtsystems mit Silberreflektorschicht und zusätzlichen Silberschutzschichten.

Nach einer Bewertung nach technologischen und wirtschaftlichen Kriterien wurden verschiedene Materialien für diese Silberschutzschichten ausgewählt und eine Versuchsmatrix erarbeitet (siehe Tabelle 1.3.2).

HI Schicht	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx
LI Schicht	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx
Diffusionsbarriere und Haftschicht					Al2O3		TiOx	TiOx			TiOx		TiOx		TiOx
Silber Schutzschicht		Cr	Cr	CrOx	CrOx	CrOx	CrOx		NiCrOx	CrOx		CrOx		CrOx	
Silber Reflektorschicht	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag
Haftschicht für Silber	Cu	Cu	Ti	Ti	Ti	NiV	NiV	NiV	NiV	NiCr	NiCr	NiCr	NiCr	VA	VA
Diffusionsbarriere	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiAlN	TiAlN	TiOxNy	TiOxNy
Substrat															

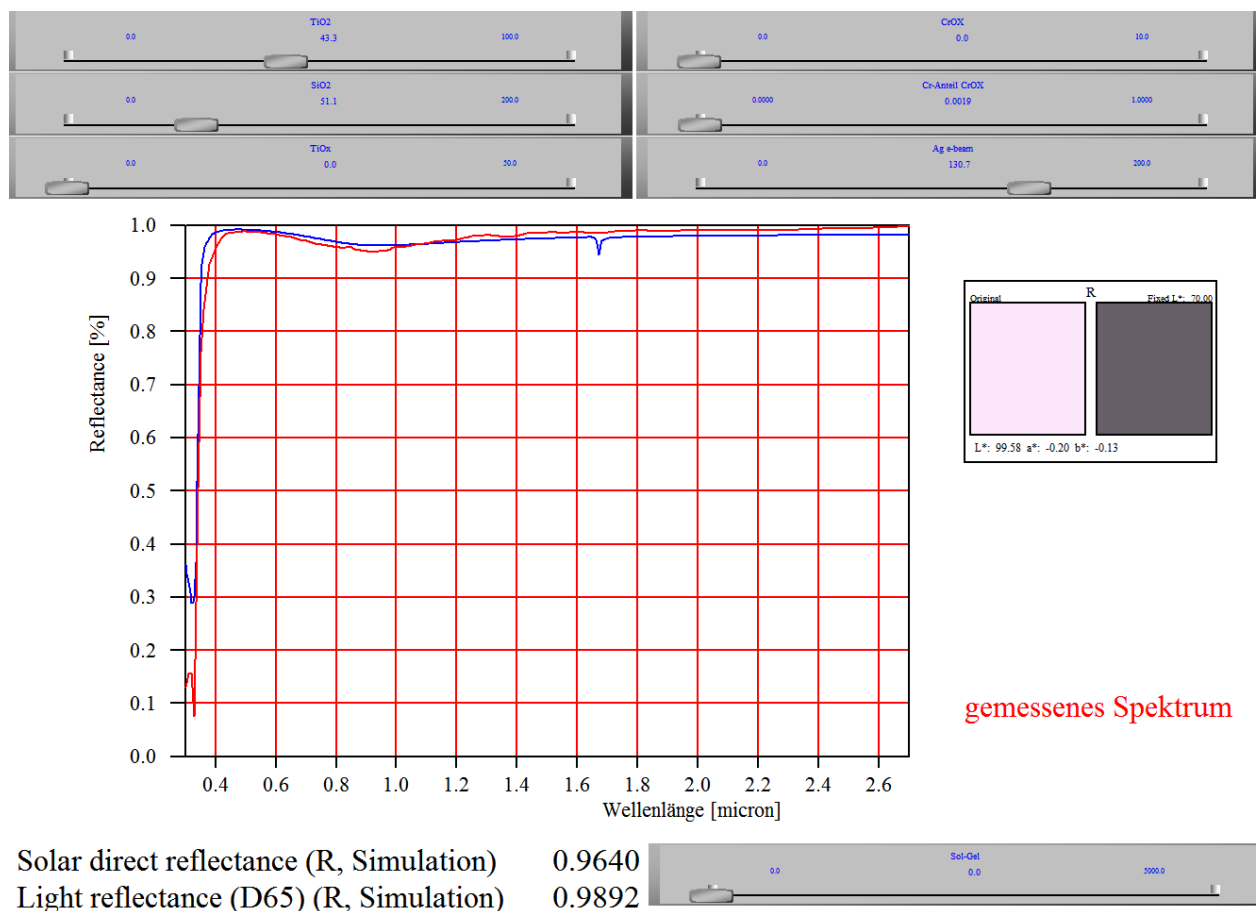
Tabelle 1.3.2 : Versuchsmatrix

## Optische Simulation der Schichtsysteme

Die optischen Eigenschaften der ausgewählten Schichtsysteme wurden mittels des optischen Simulationsprogramms „CODE“ simuliert und optimiert. Dabei werden nur optisch aktive Schichten oberhalb der Silberschicht berücksichtigt. Die Dicke der Silberschicht wird

stets so groß gewählt, dass sie optisch dicht ist, d.h. dass keine elektromagnetische Strahlung die Silberschicht durchdringt und somit mit den darunterliegenden Schichten interagieren kann. Aus den Simulationen ist bekannt, dass die Silberschicht mindestens 100nm dick sein muss, um diese Bedingung zu erfüllen. Auch nur dann wird die maximale Reflexion erreicht. Ein Vergleich mit dem gemessenen Spektrum (rot) der silberbasierten Reflexionschicht für Beleuchtungszwecke und dem simulierten Spektrum (blau) zeigt die Leistungsfähigkeit des Modells (siehe Grafik 1.3.6)

Daneben zeigt das Model, dass ohne Sol-Gel Schicht theoretisch eine solare Reflexion von über 96% erreichbar ist.



Grafik 1.3.6: Oberfläche des "CODE" Modells für die optische Simulation der Schichtsysteme

Wird in der Simulation zusätzlich eine  $\text{SiO}_2$  Schicht, die der Sol-Gel Schutzschicht entsprechen soll, angenommen, wird die solare Reflexion durch die auftretenden Interferenzen etwas reduziert (siehe Grafik 1.3.7), jedoch nicht so stark wie bei realen Sol-Gel Schichten (siehe Grafik 1.3.4).

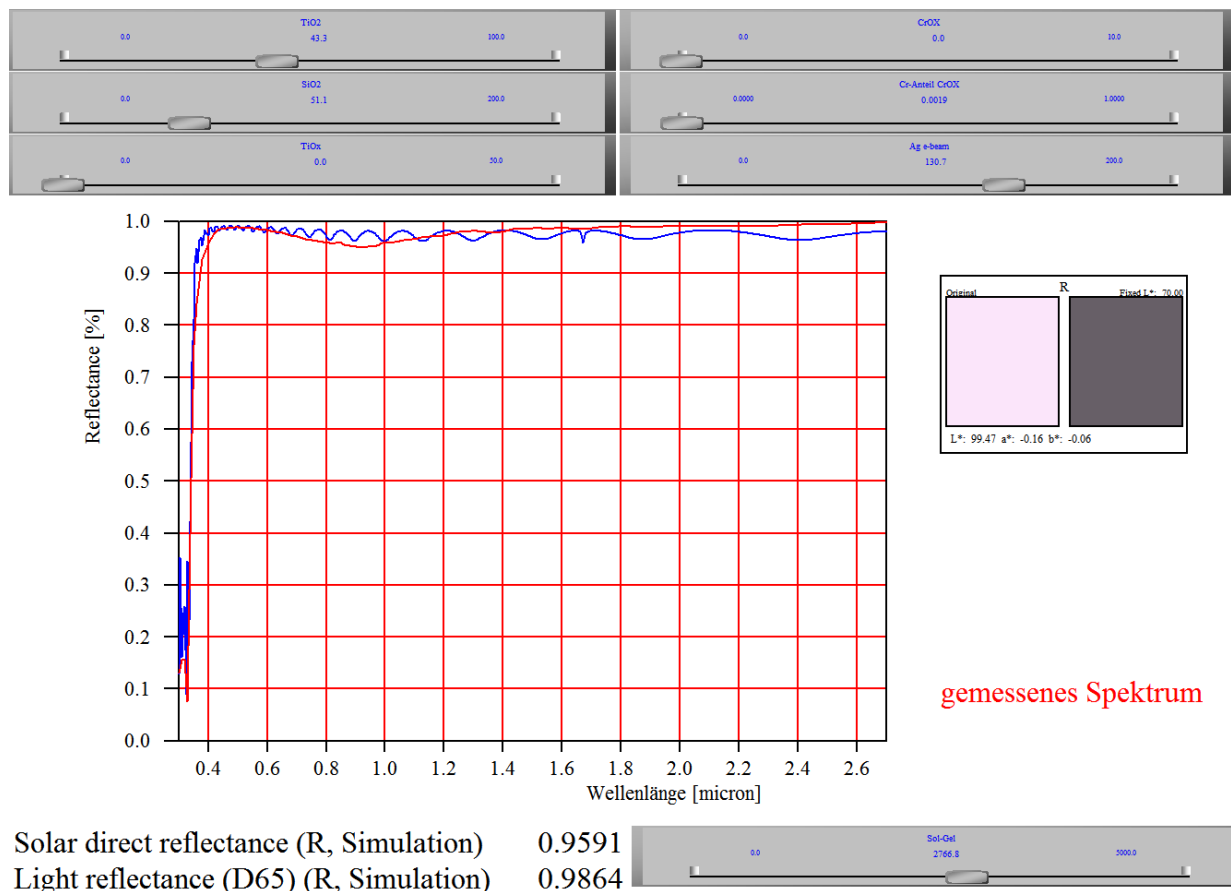
Auch die Variation der Schichtdicke der simulierten  $\text{SiO}_2$  Schutzschicht in weiten Bereichen 2 – 5  $\mu\text{m}$  hat keinen wesentlichen Einfluss auf die solare Reflexion. Daraus kann geschlossen werden, dass in realen Sol-Gel Schichten noch Absorption auftritt. Hier besteht also noch Verbesserungspotential für die Sol-Gel Zusammensetzung und Abscheidung.

Für die Simulation von weiteren Schichten zwischen Silberschicht und LI-HI Schichtsystem wurde "Effektiv-Medien-Theorie" verwendet, u. a. das Bruggeman Modell, um die Zusammensetzung von reaktiv gesputterten Schichten simulieren zu können.

Aus den Simulationen konnte geschlossen werden, dass die Silberschutzschichten nicht zu dick sein dürfen, um die Reflexion nicht signifikant zu reduzieren. Z. b. wird durch eine 10nm dicke CrOx Schicht die Reflexion schon um über 1% reduziert. Falls diese Schicht nicht stöchiometrisch ist, sinkt die Reflexion schon um mehrere Prozent ab (siehe Grafik 1.3.8). Daher müssen die Abscheidebedingungen für diese Schichten genau kontrolliert werden.

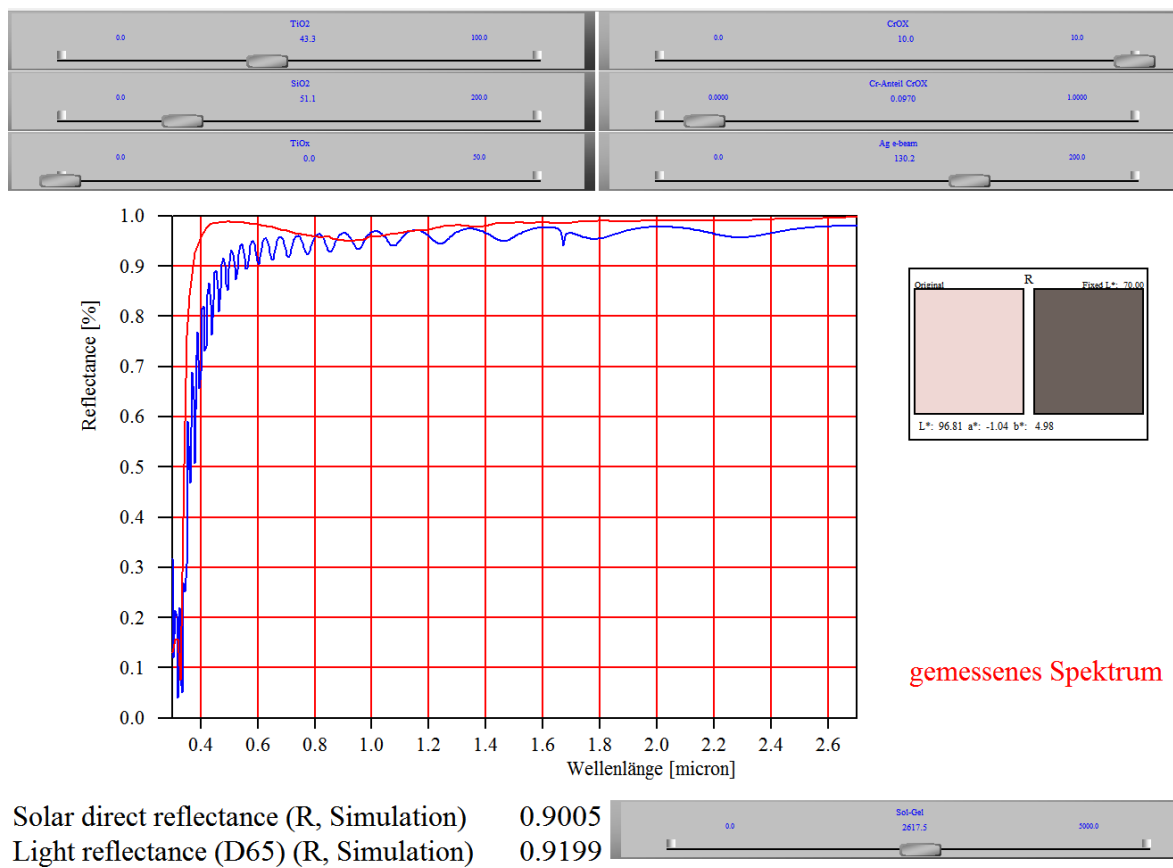
Z. B. kann eine TiOx Schicht wesentlich dicker sein, um die Reflexion um den gleichen Betrag zu reduzieren (siehe Grafik 1.3.9). Ob diese Schicht dann auch einen effektiveren Korrosionsschutz bietet, wurde in den geplanten Versuchen untersucht.

In Abscheidungsversuchen musste somit die optimale Kombination aus Schutz der Silberschicht und den optischen Eigenschaften des Schichtsystems gefunden werden.

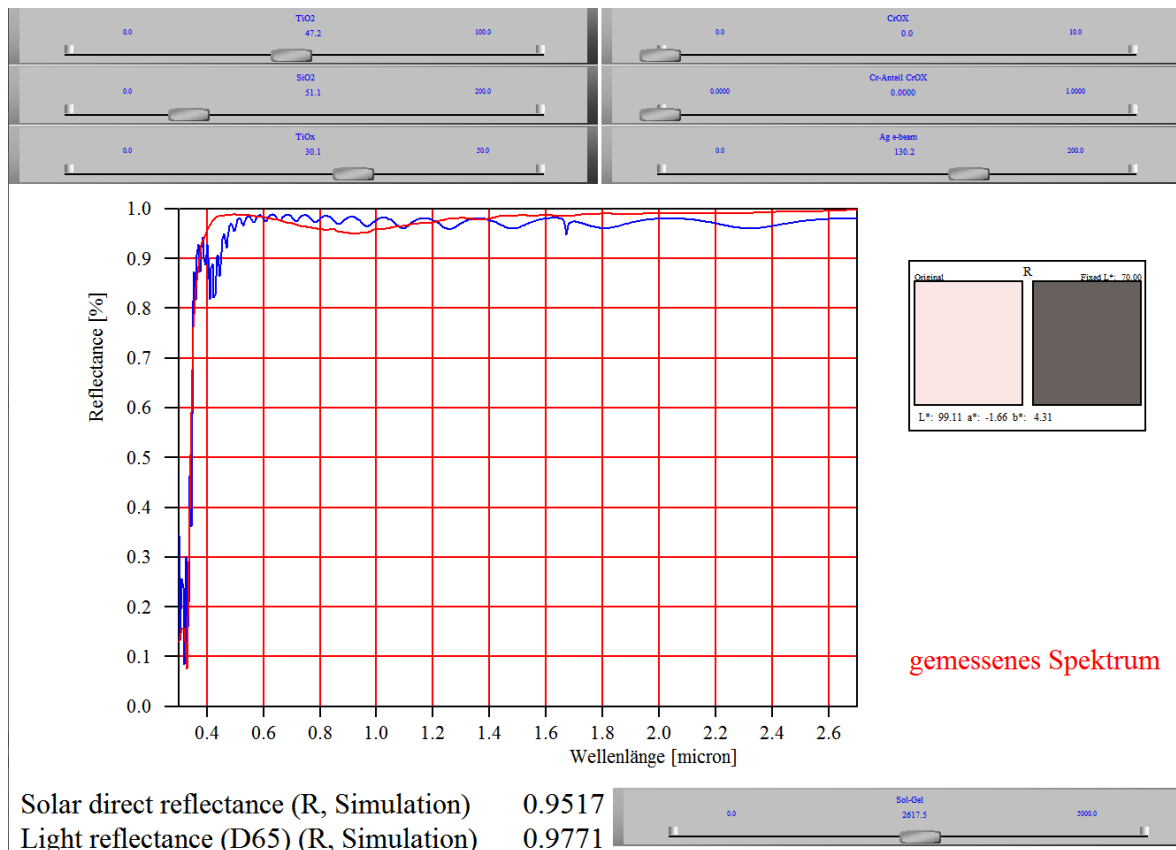


gemessenes Spektrum

Grafik 1.3.7: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit einer SiO<sub>2</sub> Schutzschicht.



Grafik 1.3.8: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit CrOx Silberschutzschicht



Grafik 1.3.9: Simulation eines Silber basierten Schichtsystems mit TiOx Silberschutzschicht

## 5. Abscheidung verschiedener ausgewählter Reflektor Schichtsysteme auf Standard Aluminium Substrat

Die in AP 1.3.1 erarbeitete Versuchsmatrix für aussichtsreiche Schichtsysteme (siehe Tabelle 1.3.2) wurde in AP 1.3.2 größtenteils abgearbeitet.

Auf einer industriellen PVD-Bandbeschichtungsanlage (siehe Bild 1.3.5) wurden die in Tabelle 1.3.3 rot markierten Schichtsysteme auf elektrochemisch geglänztem und anodisiertem Aluminiumsubstrat abgeschieden. Dazu wurden die verschiedenen Sputter- und Aufdampfstationen mit den entsprechenden Prozessmaterialien bestückt, um die gewünschten Schichtsysteme abzuscheiden.

Dabei wurden einige Verbindungen reaktiv durch kontrollierte Zugabe von entsprechenden Prozessgasen abgeschieden. Die Schichtdicken der einzelnen Lagen wurden online ellipsometrisch und die Reflexion des Gesamtschichtsystems mit VIS-NIR Spektrometern gemessen.



Bild 1.3.5: Industrielle air-to-air PVD Bandbeschichtungsanlage

			Gen 2 C		Gen 1		Gen 2 A				Gen 2 B	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
HI Schicht	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx
LI Schicht	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx
Diffusionsbarriere und Haftschrift				TiOx	TiOx			TiOx		TiOx		TiOx
Silber Schutzschicht		CrOx	CrOx	CrOx		NiCrOx	CrOx		CrOx		CrOx	
Silber Reflektorschicht	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag
Haftschrift für Silber	Cu	Cu	NiV	NiV	NiV	NiV	NiCr	NiCr	NiCr	NiCr	VA	VA
Diffusionsbarriere	TiOx	TiOx	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiAlN	TiAlN	TiOxNy	TiOxNy
Substrat												
Initial TR [%]	98,7	98,5	98,9	98,7	99,0	98,9	98,7		98,8		99,0	
hemispherical solar R sol-gel A			96,5		96,8		96,4				96,4	
hemispherical solar R sol-gel B			96,5		96,4		96,2				96,5	
Temperature 250°C - 100h												
TR [%]	93,2	95,2	98,7	98,6	98,9	91,1	98,4		98,3		98,3	
ΔTR	-5,5	-3,3	-0,2	-0,1	-0,1	-7,8	-0,3		-0,5		-0,7	
DH 85°C/85%r.H. - 1000h												
TR [%]	97,3	98,2	99,1	98,9	99,1	98,5	98,6		98,7		99,0	
ΔTR	-1,4	-0,3	0,2	0,2	0,1	-0,4	-0,1		-0,1		0,0	
UV 0.53W/mm2@340nm-65°C 200h												
TR [%]	97,1	97,2	97,7	98,6	98,7	98,3	98,1		97,7		98,5	
ΔTR	-1,6	-1,3	-1,2	-0,1	-0,3	-0,6	-0,6		-1,0		-0,5	
NSS												
TR [%]	95,1	96,4	97,1	96,6	97,0		96,9		96,9		96,4	
ΔTR	-3,6	-2,1	-1,8	-2,1	-2,0		-1,8		-1,9		-2,6	

Tabelle 1.3.3: Versuchsmatrix mit Ergebnissen der verschiedenen Degradationstests und der durch das DLR gemessenen hemisphärischen solaren Reflexion.

## 6. Charakterisierung der Reflektor Schichtsysteme

Die im Rahmen des AP 1.3.2 hergestellten neuen Schichtsysteme wurden optisch vermessen (siehe Tabelle 1.3.3). Alle weisen eine Totalreflexion größer 98% auf. Um eine Vorauswahl



für die besten Schichtsysteme treffen zu können, wurden die verschiedenen Schichtsysteme Degradationsuntersuchungen unterzogen:

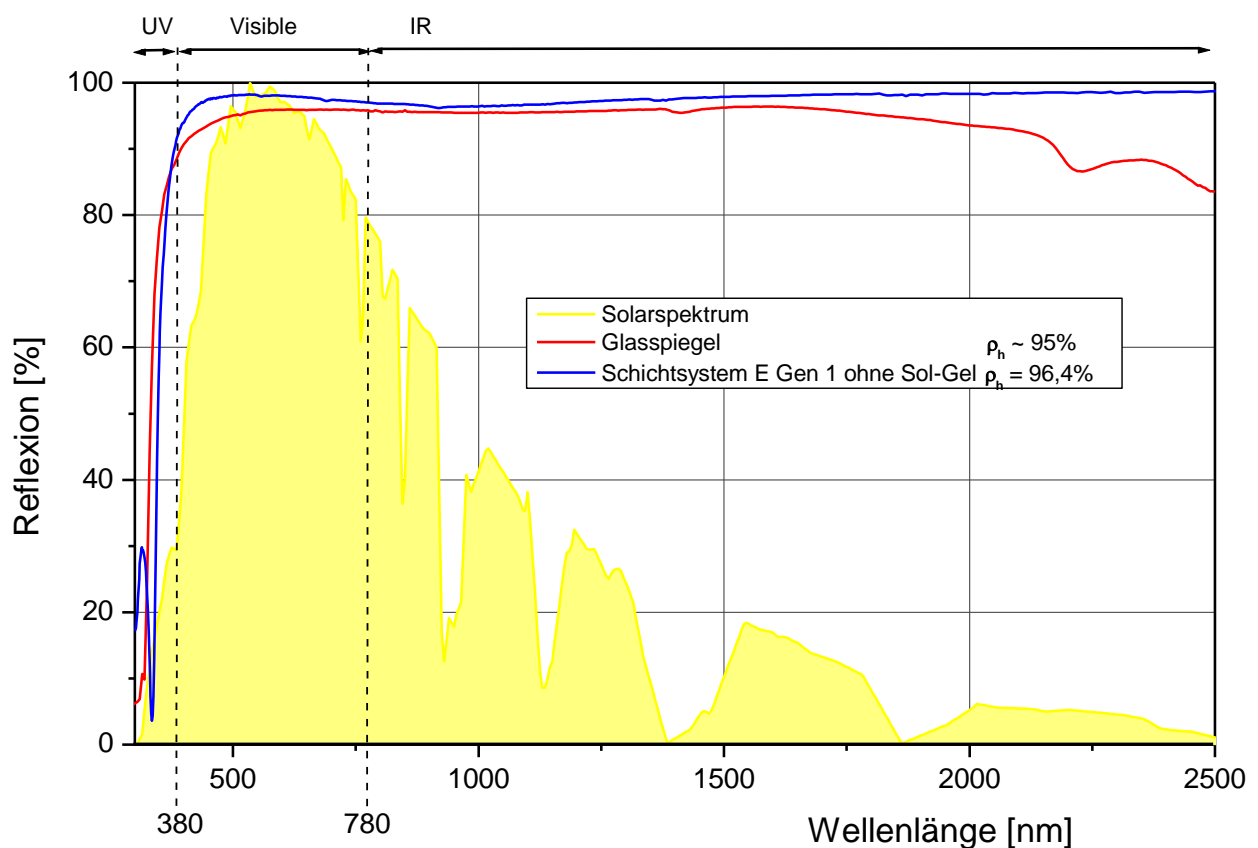
- Temperaturtest bei 250°C über 100h
- „Damp heat“ Test 85°C / 85% r. H. über 1000h
- UV Test über 200h
- Salzspraytest über 24h

Für die Bewertung der hergestellten Schichtsysteme wurde zunächst die Totale Reflexion gemessen. Nach Optimierung der Schichtdicke der Silber Schutzschicht wiesen alle hergestellten Schichtsysteme eine Total Reflexion über 98 % auf.

Die Ergebnisse der Degradationstests sind in Tabelle 1.3.3 zusammengefasst.

Der Tabelle kann man entnehmen, dass das Schichtsystem E in allen Tests die geringste Degradation aufweist. In Grafik 1.3.10 ist das Reflexionsspektrum des Schichtsystems E aufgetragen (ohne Sol-Gel Schutzschicht).

Dieses Schichtsystem weist eine hemisphärische solar-gewichtete Reflexion von 96,4% auf.



Grafik 1.3.10: Reflexionsspektrum des Silber basierten Schichtsystems E.

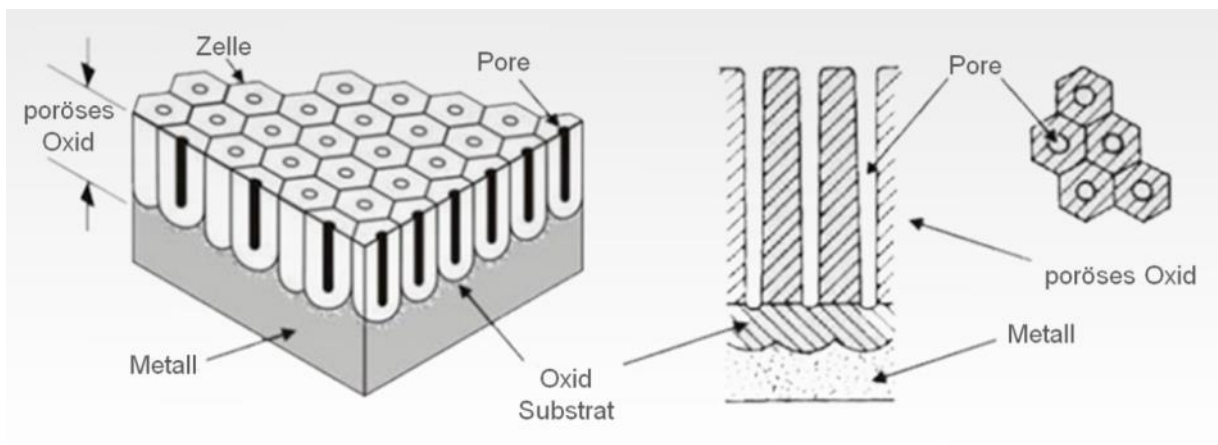
## 7. Optimierung Reflektormaterial für die Montage mittels Klebtechnik

Im AP 1.1.1 mussten die Reflektorbleche mittels Klebverfahren auf die Parabolrinnenstruktur gefügt werden. Daher musste die Rückseite des Substrates so optimiert werden, dass der verwendete Kleber gut auf der Oberfläche haftet.

Bei Aluminium, das letztendlich als Substrat ausgewählt wurde, kann die Aluminiumoberfläche durch Anodisieren in einem weiten Bereich modifiziert werden.

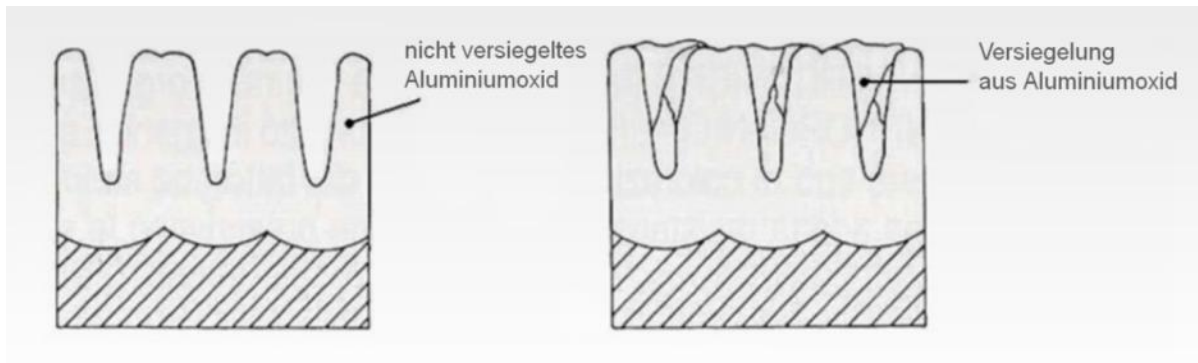
Bei der elektrochemischen Anodisierung wird das Aluminium in verdünnte Schwefelsäure eingebracht. In dem Bad wird das zu anodisierende Blech als Anode geschaltet und eine Gleichspannung von üblicherweise etwa 5 – 50V angelegt.

Die Kathode ist üblicherweise aus Blei. In dem elektrischen Feld wandern sauerstoffhaltige Anionen zur Aluminiumoberfläche. Dort reagieren sie mit der Aluminiumoberfläche, und es bildet sich Aluminiumoxid, das aufgrund seines größeren Volumens aus der ursprünglichen Metalloberfläche herauswächst, aber mit dem Aluminium fest verbunden bleibt. Dabei entstehen kapillarähnliche Poren im Aluminiumoxid mit einem Durchmesser von in der Regel 10nm bis 50nm (siehe Grafik 1.3.11 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



Grafik 1.3.11: Schematischer Aufbau einer Anodisierungsschicht mit Poren.

In die Poren kann leicht Feuchtigkeit eindringen, so dass die Poren normalerweise in einem anschließenden Prozessschritt in heißem Wasser versiegelt werden (siehe Grafik 1.3.12). So wird eine gegen Umwelteinflüsse stabile Oberfläche erzeugt.



Grafik 1.3.12: Schematische Darstellung der Versiegelung der Anodisierungsschicht

Um zu untersuchen, wie die Anodisierungsschicht am besten beschaffen sein muss, um eine gute Klebstoffhaftung zu erhalten und das Spiegelsubstrat langfristig vor Korrosion zu schützen, wurden verschiedene Anodisierungsschichten präpariert:

1. ) 1,2µm dicke Anodisierungsschicht mit versiegelten Poren
2. ) 0,1µm dicke Anodisierungsschicht mit versiegelten Poren
3. ) zwei verschiedene Anodisierungen mit geöffneten Poren

Für die Klebeversuche wurden Probekörper aus Beton von der RUB in der Abmessung 300X300mm und zur Untersuchung der thermischen Ausdehnung Probekörper in der Abmessung 500X500mm von der Uni Kaiserslautern gefertigt.

Für diese Probekörper wurde Material in verschiedenen Dicken mit den verschiedenen anodisierten Rückseiten zugeschnitten und an die Projektpartner versandt (siehe Tabelle 1.3.4).

Zum Schutz der Spiegeloberfläche wurde diese mit einer Schutzfolie bezogen. Es sollte geprüft werden, ob die Schutzfolie die Spiegelbeschichtung während des Klebprozesses ausreichend schützt.

Adressat	Verwendung	Dicke	Dimensionen	Anzahl	Rückseite
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	300X300mm	50	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	300X300mm	20	0,1µm anodisiert, Poren versiegelt
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	300X300mm	15	geöffnete Poren Paremeter 1
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	300X300mm	15	geöffnete Poren Paremeter 2
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,5mm	300X300mm	20	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Ruhr-Uni-Bochum	Klebetests AP1.1.1	0,3mm	300X300mm	20	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Uni-Kaiserslautern	Betondehnung AP1.2	0,7mm	500X500mm	10	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Uni-Kaiserslautern	Betondehnung AP1.2	0,5mm	500X500mm	20	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Uni-Kaiserslautern	Betondehnung AP1.2	0,3mm	500X500mm	20	1,2µm anodisiert; Poren versiegelt
Uni-Kaiserslautern	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	500X500mm	15	geöffnete Poren Paremeter 1
Uni-Kaiserslautern	Klebetests AP1.1.1	0,7mm	500X500mm	15	geöffnete Poren Paremeter 2

Tabelle 1.3.4: Übersicht der Aluminiumproben mit verschiedenen präparierten Rückseiten für die Klebeversuche.

Im AP 1.1.1 und 1.1.2 wurden mit diesen Proben verschiedene Methoden zum dauerhaften Fügen der Aluminiumspiegel auf die Betonoberfläche untersucht. Zum einen wurde der frische Beton direkt auf die Spiegelrückseite betoniert, zum anderen wurde der Spiegel nachträglich auf den Festbeton aufgeklebt. Bei direkter Betonage auf die Spiegelrückseite konnte Aufgrund einer chemischen Reaktion zwischen dem frischen alkalischen Beton und der Spiegelrückseite unabhängig von den Anodisierungsparametern keine ausreichende Haftung erzielt werden.

Daher wurde versucht, die Aluminiumproben auf die bereits erhärtete Betonoberfläche mit verschiedenen Klebesystemen zu fügen. Bei diesen Tests wurde nur eine geringe Abhängigkeit der Klebkraft von den Anodisierungsparametern festgestellt. Daher wurde letztendlich für weitere Tests die 1,2µm dicke Anodisierung mit versiegelten Poren ausgewählt, da diese den besten Korrosionsschutz für das Aluminiumsubstrat gewährleistet.

Es wurden Aluminiumproben mit dieser Anodisierungsschicht an die Firma TESA zur Auswahl geeigneter Klebesysteme gesandt.

Nach Abzugstests wurden zwei Klebebänder von TESA ausgewählt, die beidseitig mit einem modifizierten Acrylatkleber versehen sind und die eine gute Haftung sowohl auf der anodisierten Rückseite des Spiegelmaterials wie auch auf Beton aufweisen. Zwischen den beiden Kleberschichten befindet sich PE-Schaum mit einer Dicke von 0,5mm bzw. 1,1mm, der in der Lage ist, Querkräfte aufzunehmen.

Da die Aluminiumspiegel (0,4mm dick) auf eine Parabolrinne aus Beton aufgeklebt werden, müssen die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Beton ( $11 \cdot 10^{-6}$ ) und Aluminium

( $23,8 \cdot 10^{-6}$ ) berücksichtigt werden. Im Einsatz werden Temperaturschwankungen von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  erwartet, sodass erhebliche Spannungen zwischen Spiegel und Beton unter Temperaturwechselbelastung auftreten.

Wenn man davon ausgeht, dass die Spiegel bei  $20^{\circ}\text{C}$  aufgeklebt werden, ergibt sich ein  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$  zwischen dem zu erwartenden Temperaturminimum bzw. Temperaturmaximum.

Bei einer Länge der Aluminiumspiegelelemente von 3m ergibt sich dann eine Längendifferenz zwischen Beton und Spiegel von etwa 1,5mm.

Nach Angaben von TESA sind die verwendeten PE-Schäume in der Lage Längenausdehnungsunterschiede von etwa 50% – 60% ihrer Dicke auszugleichen.

Letztendlich wurde das 1,1mm dicke Klebeband für die Verklebung der Spiegel auf dem Testelement ausgewählt.

Es wurden Versuche auf einer industriellen Bandlaminierungsanlage durchgeführt (siehe Bild 1.3.6). Dabei wurde das 1,1mm dicke Klebeband auf die Rückseite von 1200mm breitem und 0,4mm dickem Aluminiumspiegelmaterial auflaminiert.

Das Klebeband konnte plan aufgebracht werden und weist eine gute Haftung auf dem Aluminiummaterial auf. Dieses Spiegelmaterial wurde auf das Parabol-Testelement und später auf die Parabolrinne des Demomonstrators aufgebracht (Siehe AP4).



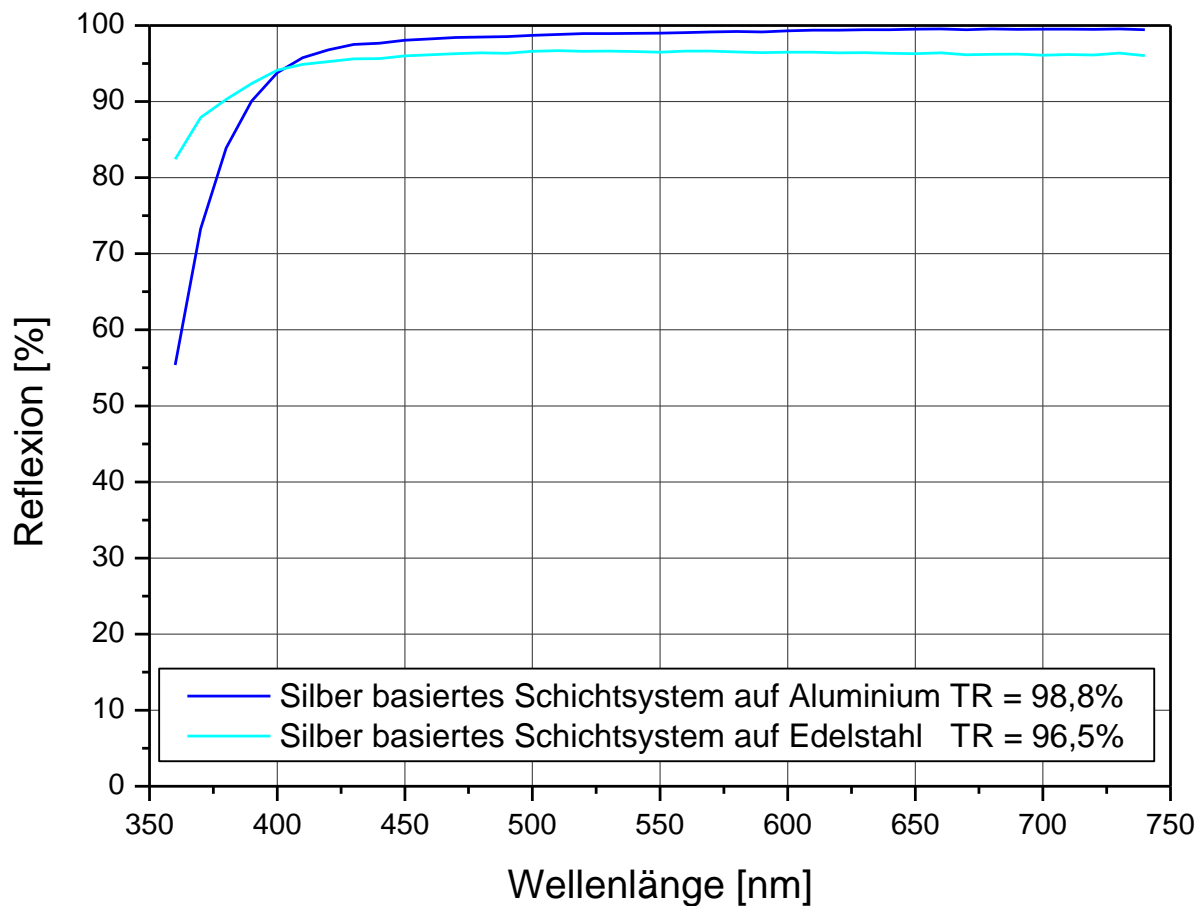
Bild 1.3.6: Auflaminieren des TESA Klebebandes mit einer industriellen Laminierungsanlage.

Daneben wurden aus diesem Material 10 X 10 cm große Platten geschnitten, die beim DLR mit unterschiedlichen Verfahren auf 10 X 10 cm große Betonprobekörper geklebt wurden. Diese Probekörper wurden beim DLR unterschiedlichen Degradationstests unterworfen (siehe AP 1.4).

## 8. Abscheidung verschiedener ausgewählter Reflektor Schichtsysteme auf alternativen Substraten

Da der Ausdehnungskoeffizienten von Stahl ( $11,7 \cdot 10^{-6}$ ) sich unwesentlich von dem Ausdehnungskoeffizienten von Beton ( $11 \cdot 10^{-6}$ ) unterscheidet, würden bei der Verwendung dieses Substrates wesentlich geringere Temperaturspannungen zwischen Spiegelmaterial und Beton entstehen.

Daher wurde das Silber basierte Spiegelschichtsystem auf verschiedenen Edelstahlsubstraten mit „spiegelblanker“ Oberfläche abgeschieden. Dafür wurden A4 Blechproben auf Aluminiumband aufgeklebt und durch die PVD Bandbeschichtungsanlage gefahren.



**Grafik 1.3.13: Reflexionsspektrum eines silber basierten Schichtsystems auf elektrochemisch geglänztem Aluminium und auf spiegelblankem Edelstahl**

Allerdings wurde kein Stahlsubstrat in Bandform gefunden, dass eine ähnlich glatte Oberfläche wie elektrochemisch geglänztes Aluminium aufweist.

Daher war die Reflexion auf allen getesteten Edelstahlsubstraten geringer wie auf elektrochemisch geglänztem Aluminium (siehe Grafik 1.3.13).

Da die Temperaturwechselbelastungstests an dem Parabol-Testelement mit dem aufgeklebten Aluminiumspiegelmaterial zufriedenstellend ausgefallen sind, wurde entschieden, keine weiteren Tests mit Stahlsubstraten durchzuführen.

## 9. Optimierung Schutzschicht

### AP 1.3.6.1 Optimierung der Haftung Sol-Gel basierter Schutzschichten auf dem PVD Spiegelschichtsystem.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Haftung der  $\text{SiO}_x$  basierten Sol-Gel Schichtsysteme auf der obersten PVD Schicht, die bisher aus  $\text{TiO}_x$  besteht, zu verbessern. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde dazu nicht eine zusätzliche PVD Schicht auf der  $\text{TiO}_x$  Schicht abgeschieden, sondern die  $\text{TiO}_x$  Schicht durch eine andere Schicht ersetzt. Dies bietet den Vorteil einer einfacheren Prozessführung und einer wirtschaftlicheren Herstellung.

Optimal sind naturgemäß Silizium basierte Schichten, an die das Sol-Gel optimal andocken kann. Somit ist  $\text{SiO}_2$  die optimale oberste PVD Schicht. Allerdings kann man aufgrund des geringen Brechungsindex von  $\text{SiO}_2$  keine Gesamtreflexion im sichtbaren Bereich über 98% erreichen. Somit muss für Spiegelsystem, die für Beleuchtungsanwendungen vorgesehen sind, auf die  $\text{SiO}_2$  Schicht eine hochbrechende Schicht (z. B. das oft verwendete  $\text{TiO}_2$ ) aufgebracht werden.

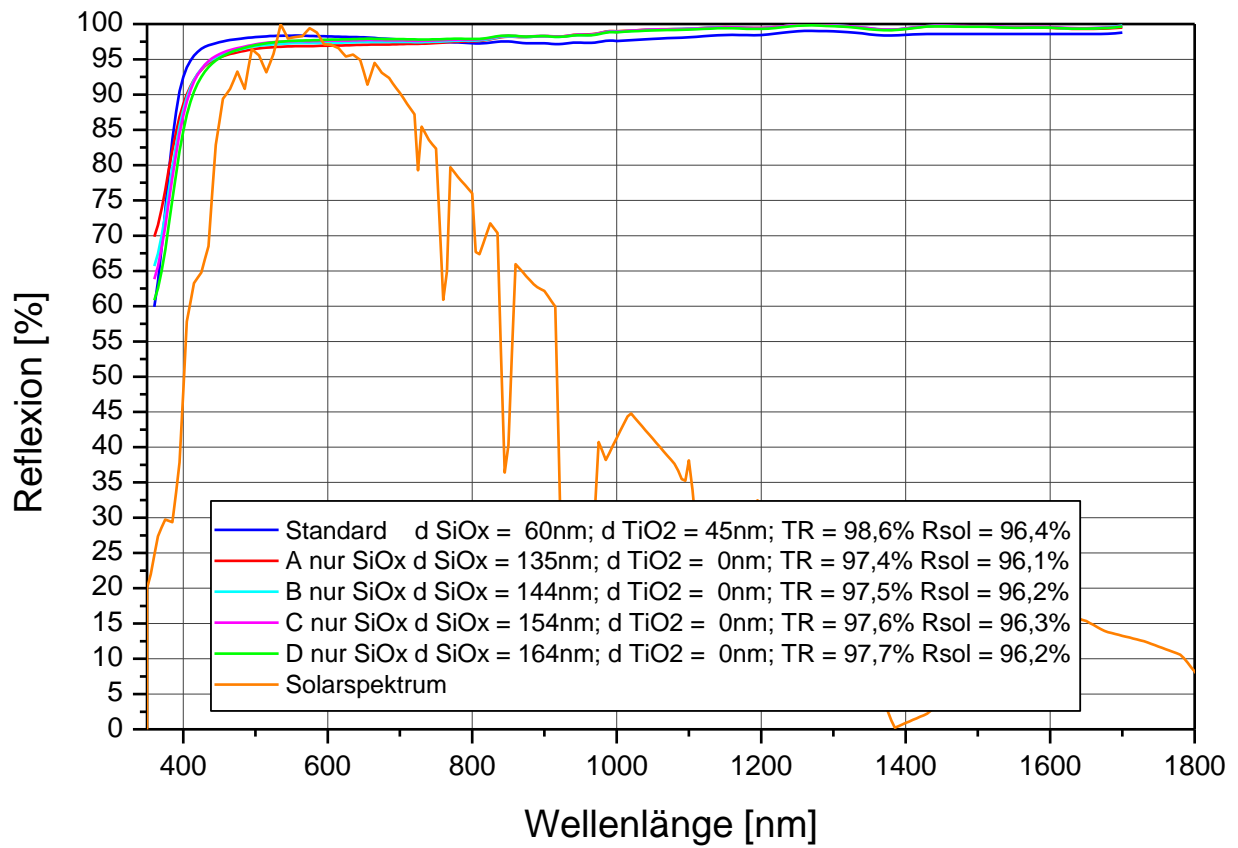
Durch Simulationen konnte aber gezeigt werden, dass bei der Verwendung einer wesentlich dickeren  $\text{SiO}_2$  Schicht von etwa 150 bis 160nm auch eine hinreichend hohe solare Reflexion erreicht werden kann, wenn diese Schicht nicht durch eine hochbrechende Schicht abgedeckt wird.

Daher wurden Silber basierte Schichtsysteme mit  $\text{SiO}_2$  Deckschichten mit Dicken im Bereich von 135 bis 164nm hergestellt. In Grafik 1.3.14 sind die Reflexionsspektren dieser Schichtsysteme und die daraus ermittelte totale sichtbare und hemisphärische solare Reflexion aufgetragen. Man erkennt, dass eine optimale hemisphärische solar-gewichtete Reflexion bei einer  $\text{SiO}_2$  Schichtdicke von 154nm erreicht wird. Diese ist mit einem Wert von 96,3% vergleichbar mit dem Wert eines Schichtsystems mit  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  Deckschichtsystem.

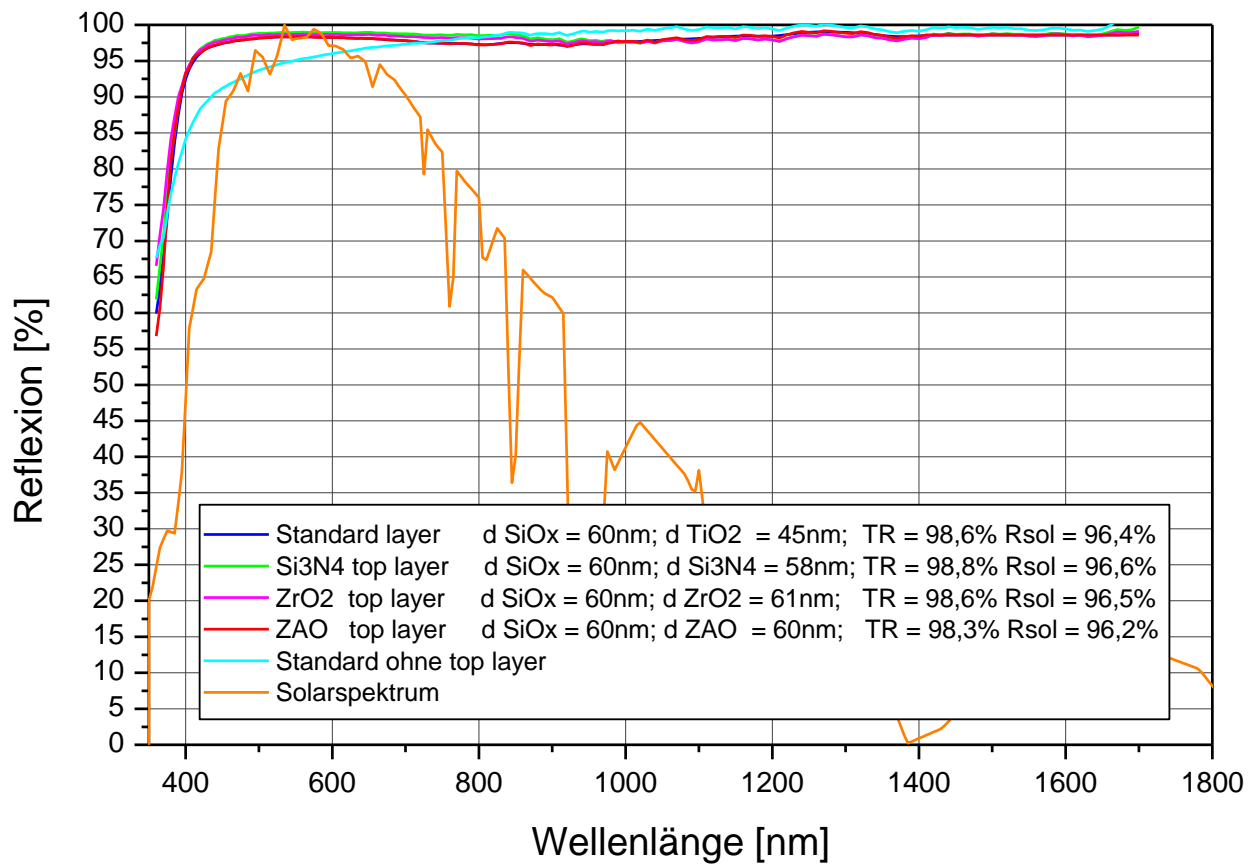
Daneben wurden noch Schichtsysteme abgeschieden, bei denen die  $\text{TiO}_x$  Schicht durch eine  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{ZrO}_2$  oder eine ZAO Schicht ersetzt wurde. Auch mit diesen Schichtsystemen wurde eine vergleichbar hohe solare Reflexion erreicht (siehe Grafik 1.3.15).

Diese vier Schichtsysteme wurden den in AP 1.3.3 beschriebenen Degradationstests unterzogen. Bei vergleichbar guten Degradationsergebnissen im Temperatur-, damp heat und UV Test, zeigen diese Schichtsysteme eine etwas höhere Korrosionsstabilität (siehe Tabelle 1.3.5). Nur das Schichtsystem mit  $\text{SiO}_2/\text{ZAO}$  Deckschichten zeigt eine deutlich geringere Korrosionsstabilität.





Grafik 1.3.14: Reflexionsspektren des Silber basierten Schichtsystems nur mit SiOx Deckschicht mit verschiedener Dicke.



Grafik 1.3.15: Reflexionsspektren des Silber basierten Schichtsystems mit SiOx/Si3N4, SiOx/ZrO2 bzw. SiOx/ZAO Deckschichten.

	Gen 1	Gen 2 A	Gen 2 B	Gen 2 C	Gen 3 A	Gen 3 B	Gen 3 C	Gen 3 D
	E	G	K	C				
HI Schicht	TiOx	TiOx	TiOx	TiOx		Si3N4	ZrOx	ZAo
LI Schicht	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx	SiOx
Diffusionsbarriere und Haftschrift	TiOx							
Silber Schutzschicht		CrOx	CrOx	CrOx	CrOx	CrOx	CrOx	CrOx
Silber Reflektorschicht	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag
Haftschrift für Silber	NiV	NiCr	VA	NiV	NiV	NiV	NiV	NiV
Diffusionsbarriere	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy	TiOxNy
Substrat	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
Initial TR [%]	99,0	98,7	99,0	98,9	97,7	98,8	98,6	98,4
hemispherical solar R ohne Sol-Gel	96,4	96,1	96,3	96,4	96,2	96,6	96,5	96,2
hemispherical solar R Sol-Gel A	96,8	96,4	96,4	96,5	95,8	96,3	96,7	96,5
hemispherical solar R sol-gel B	96,4	96,2	96,5	96,5	95,6	96,1	96,6	96,4
hemispherical solar R sol-gel C					95,7	95,9	96,6	96,4
Temperatur 250°C - 100h								
TR [%]	98,9	98,4	98,3	98,7	97,6	98,5	98,6	98,1
ΔTR	-0,1	-0,3	-0,7	-0,2	-0,1	-0,3	0,0	-0,3
DH 85°C/85%r.H. - 1000h								
TR [%]	99,1	98,6	99,0	99,1	97,5	98,6	98,9	98,5
ΔTR	0,1	-0,1	0,0	0,2	-0,2	-0,2	0,3	0,1
UV 0.53W/mm2@340nm-65°C 200h								
TR [%]	98,7	98,1	98,5	97,7	97,8	98,1	98,4	98,0
ΔTR	-0,3	-0,6	-0,5	-1,2	0,1	-0,7	-0,2	-0,4
NSS								
TR [%]	97,0	96,9	96,4	97,1	97,4	97,7	97,4	80,0
ΔTR	-2,0	-1,8	-2,6	-1,8	-0,3	-1,1	-1,2	-18,4

Tabelle 1.3.5: Optische Werte und Ergebnisse der Degradationstests der Schichtsysteme der Generation 3 mit alternativen Deckschichten. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Schichtsysteme mit TiOx Deckschicht eingetragen.

Diese Schichtsysteme wurden im Rahmen des AP 1.3.6.2 mit verschiedenen Sol-Gel Schichtsystemen beschichtet und beim DLR dem „3 Jahre Coastal Degradationstest“ unterzogen (siehe AP 1.4)

#### AP 1.3.6.2 Optimierung Sol-Gel basierter Schutzschichten

Abhängig von den in das Sol-Gel eingebrachten funktionalen Gruppen und von den Abscheidungs- und Trocknungsparametern besitzen Sol-Gel basierte SiO<sub>x</sub> Schichten unterschiedliche Eigenschaften. Generell gilt, je mehr organische Anteile in der Schicht eingebaut sind, desto besser schützen sie die darunterliegende PVD Schicht vor korrosiven Angriff und desto geringer sind die internen Spannungen in der Schicht. Andererseits sind Schichten mit hohem organischem Anteil weniger kratz- und UV-resistent.

Mit dem Sol-Gel Lieferanten wurden daher verschiedene alternative Sol-Gel Schichtsysteme diskutiert. Letztlich wurden drei verschiedene Sol-Gel Beschichtungen getestet. In Tabelle 1.3.6 sind die unterschiedlichen Eigenschaften dieser drei Sol-Gel Systeme aufgeführt.

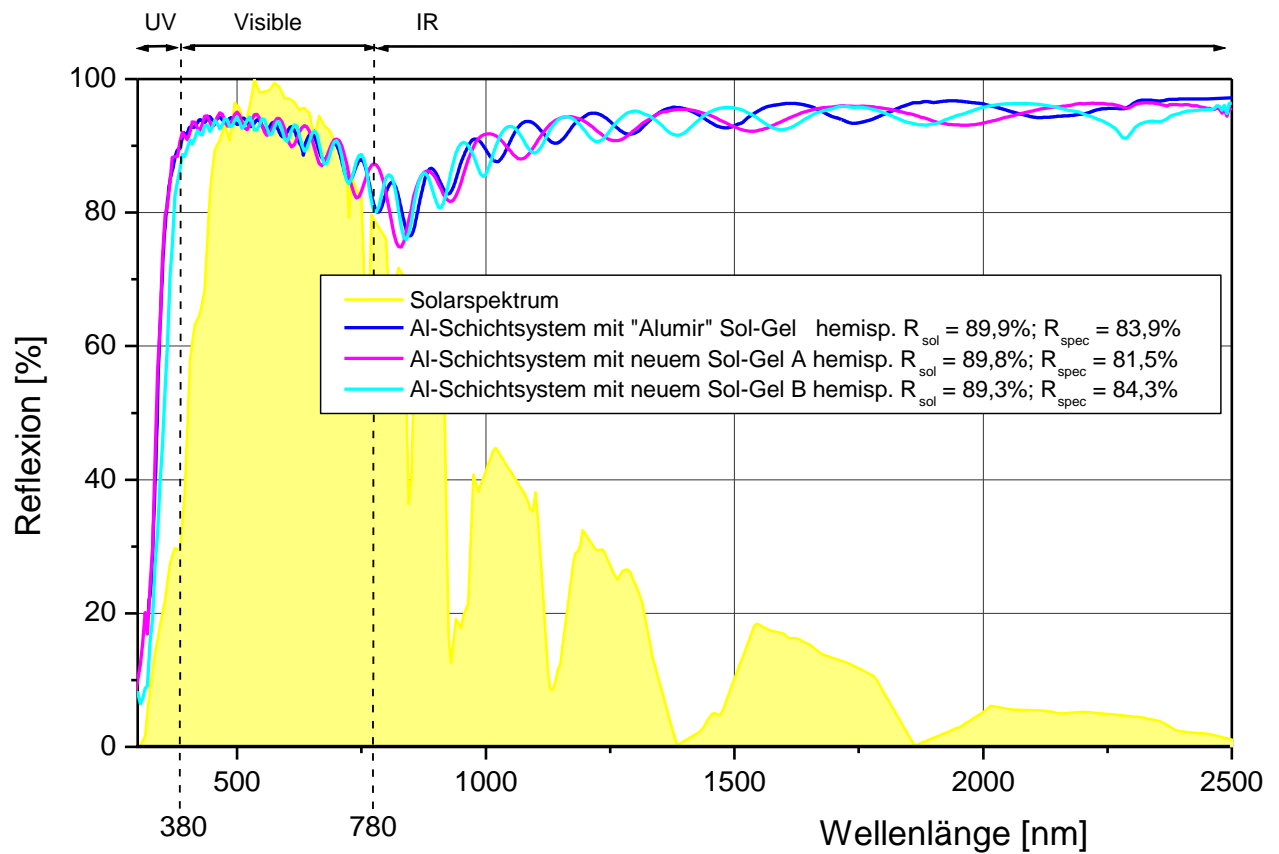
### **Sol-Gel Beschichtung von Aluminium basierten Schichtsystemen**

Für erste Tests wurden Proben des bisherigen Aluminium basierten Spiegelschichtsystems mit Sol-Gel Systemen A und B beschichtet. Daneben wurden als Referenz auch die im Alu-mir – Projekt verwendeten Sol-Gel Systeme aufgetragen.

<b>Sol – Gel A</b>	<b>Sol – Gel B</b>	<b>Sol – Gel C</b>
Höchste UV-Beständigkeit	Hoch UV-beständig	Hohe UV-Beständigkeit
Maximale Transparents	Hohe Transparents	Sehr kratzbeständig
Guter Korrosionsschutz	Sehr guter Korrosionsschutz im NSS	Guter Korrosionsschutz
Gute Verformbarkeit	Gute Verformbarkeit	Höchste Temperaturbeständigkeit
Hoch Temperaturbeständig	Hohe Kratzfestigkeit	

Tabelle 1.3.6: Eigenschaften der verwendeten Sol-Gel Systeme

Anschließend wurden die optischen Eigenschaften der Schichten durch das DLR vermessen. Die hemisphärische solar-gewichtete Reflexion der Spiegelschichtsysteme mit Reflektorschicht aus Aluminium beträgt knapp 90%, unabhängig von der verwendeten Sol-Gel Beschichtung (siehe Grafik 1.3.16).

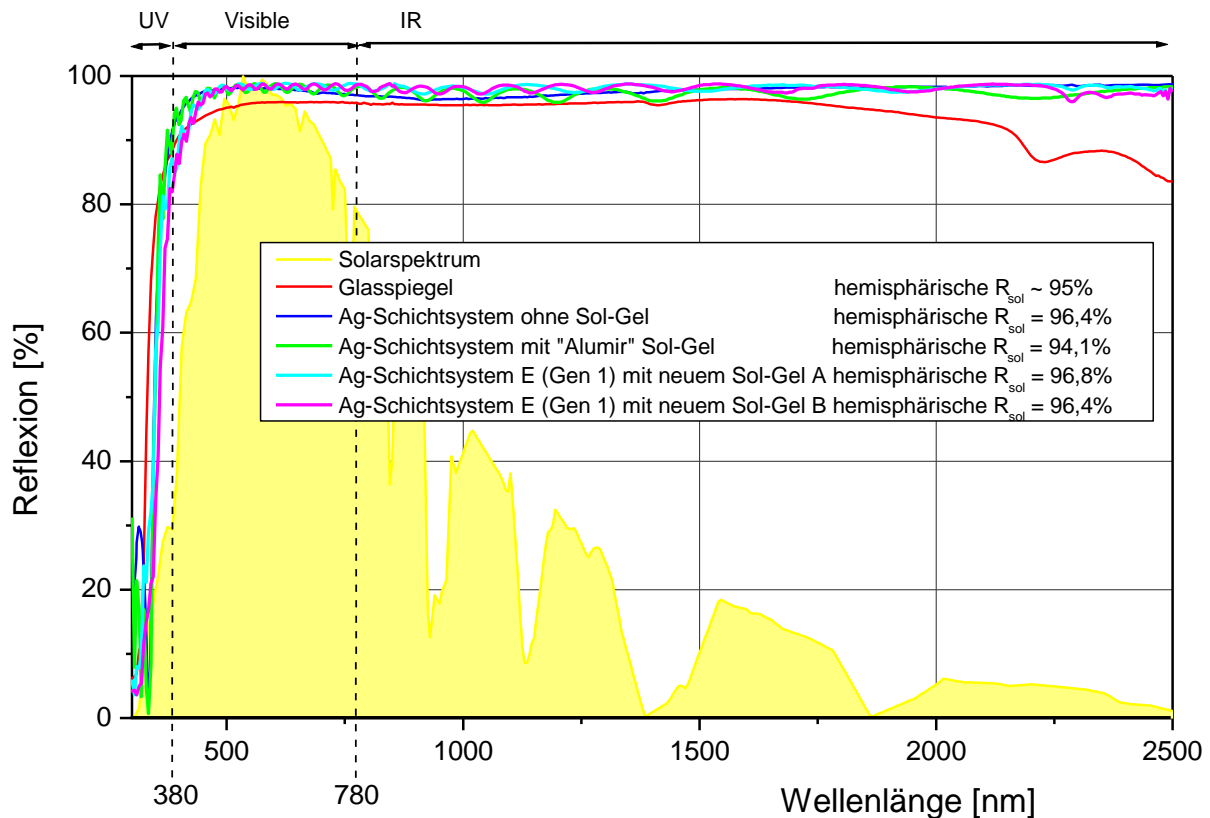


**Grafik 1.3.16: Reflexionsspektren der Aluminium basierten Schichtsystems mit verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen.**

## Sol-Gel Beschichtung von Silber basierten Schichtsystemen

### Generation 1:

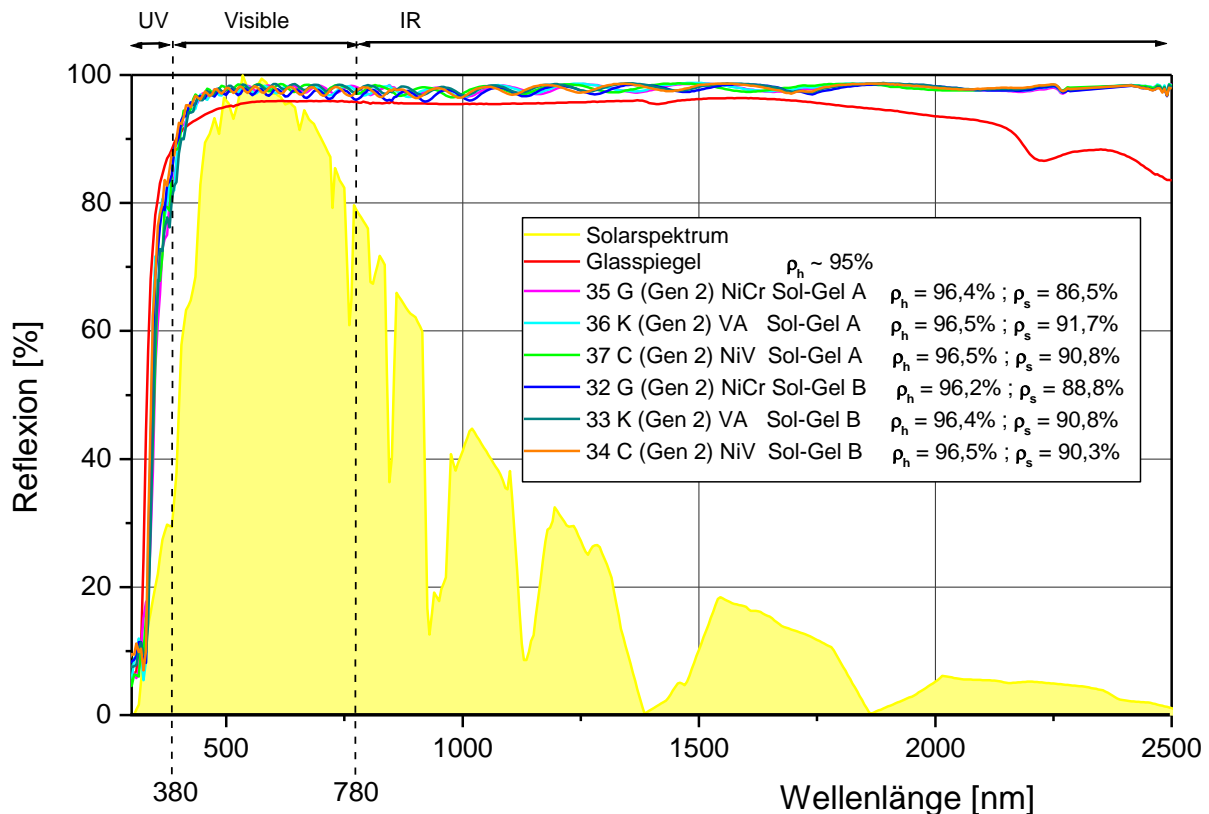
Bei dem neuen Silber basierten Schichtsystems E (Generation 1) wird mit den neuen Sol-Gel Beschichtungen eine hemisphärische solar-gewichtete Reflexion von über 96% erreicht (siehe Grafik 1.3.17). Damit ist die solare Reflexion dieser Spiegelschichtsysteme höher wie bei Glasspiegeln mit rückseitiger Silberbeschichtung!



**Grafik 1.3.17: Reflexionsspektren der Silber basierten Schichtsystems mit verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen. Als Referenz ist zusätzlich das Reflexionsspektrum eines rückseitig mit Silber beschichteten Glasspiegels aufgetragen.**

### Generation 2:

Daneben wurden auch die Schichtsysteme C, G und K (Generation 2) mit den neuen Sol-Gel Systemen beschichtet und vom DLR vermessen (siehe AP 1.4). In allen Fällen wird auch hier eine hemisphärische solare Reflexion von über 96% erreicht (siehe Grafik 1.3.18 und Tabelle 1.3.5). Somit sind alle diese Schichtsysteme von den Werten der solaren hemisphärischen Reflexion mit Silber beschichteten Glasspiegeln vergleichbar.



**Grafik 1.3.18: Reflexionsspektren der Silber basierten Schichtsysteme mit beiden Sol-Gel Beschichtungen. Als Referenz ist zusätzlich das Reflexionsspektrum eines rückseitig mit Silber beschichteten Glasspiegels aufgetragen.**

Auf all diese Schichtsystemen hat das DLR die 3 Jahre „Coastal“ Degradationsprozedur angewandt, da diese die aggressivste Testprozedur von allen drei Standortvarianten ist und somit erwartet wurde, dass Unterschiede zwischen den verschiedenen Schichtsystemen am deutlichsten sichtbar werden.

In der Tabelle 1.3.7 sind die Ergebnisse des Degradationstestes des DLR zusammengefasst. Zum Vergleich wurden auch die Ergebnisse aus dem Alumir Projekt der 3 Jahre Coastal Degradationstests an Schichtsystemen mit Aluminiumreflektorschicht mit den damals verwendeten Sol-Gel Systemen (Alumir Proben D und F) von anderen Herstellern eingetragen.

Man erkennt deutliche Unterschiede im Degradationsverhalten. Die Schichtsysteme mit Edelstahl und NiV Haftschicht für Silber und Sol-Gel System A zeigen die geringste Degradation sowohl in der hemisphärischen wie auch in der gerichteten solaren Reflexion. Hervorzuheben ist, dass diese beiden Silber basierten Schichtsysteme eine geringere Degradation zeigen als die im Alumir Projekt getesteten Aluminium basierten Schichtsysteme!

Die im AP1.4 durch das DLR durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die neuen Silber basierten Schichtsysteme keine Flächenkorrosion mehr aufweisen, wie sie bei den Aluminium basieren Schichtsystemen auftraten. Allerdings ist die Pitting Korrosion etwas stärker ausgeprägt, was sich aber anscheinend nicht so stark auf die Reflexionseigenschaften auswirkt.

Sol-Gel System B gewährleistet anscheinend einen geringeren Schutz gegen Umwelteinflüsse. Allerdings in Kombination mit einer Edelstahl Haftschrift für Silber sind die Ergebnisse auch gut.

No.	Material	Sol-Gel		before	after 3Y	Drop (%)	before	after 3Y	Drop (%)
				$\rho_h$	$\rho_h$	$\rho_h$	$\rho_s$	$\rho_s$	$\rho_s$
32	NiCr	Ag	B	96,2	89,4	6,8	88,8	66,1	22,6
33	SS	Ag	B	96,4	96,2	0,2	90,8	80,2	10,6
34	NiV	Ag	B	96,5	94,2	2,3	90,3	74,4	16,0
35	NiCr	Ag	A	96,4	94,8	1,5	86,5	79,0	7,5
36	SS	Ag	A	96,5	94,3	2,1	91,2	84,7	6,5
37	NiV	Ag	A	96,5	96,0	0,5	90,8	85,8	5,0
43	NiV G1	Ag	A	96,8	93,7	3,1	90,3	75,2	15,1
44	NiV G1	Ag	B	96,4	94,2	2,2	90,3	72,8	17,5
	Alumir D	Al	C	89,9	88,1	1,8	78,2	70	8,2
	Alumir F	Al	D	89,8	87,4	2,4	83,0	74,4	8,4

Tabelle 1.3.7: Ergebnisse der "3Y Coastal" Testprozedur des DLR

Die beiden besten Schichtsysteme 33 und 37 der Generation 2 aus dem AP1.3.2 wurden beim DLR dem „10 Jahre Dessert Degradationstest“ unterzogen, um zu untersuchen, ob hier die Korrosionserscheinungen die im „3 Jahre Coastal Degradationstest“ auftraten (siehe Tabelle 1.3.7), auch beobachtet werden.

Nach Vermessung der gerichteten Reflexion nach dem „10 Jahre Dessert Degradationstest“ viel auf, dass sich die Abnahme der gerichteten Reflexion hier umgekehrt wie nach dem „3 Jahre Coastal Degradationstest“ verhält (siehe Tabelle 1.3.8).

Material	Sol-Gel	3Y Coastal	10Y Desert
		(%)	(%)
33	B	10,6	2,9
37	A	5,0	12,3

Tabelle 1.3.8: Werte der gerichteten Reflexion nach 3Y Coastal und 10Y Desert Degradationstest.



Eventuell ist dies ein Hinweis darauf, dass das Sol-Gel System A einen besseren Schutz gegen korrosiven Angriff und das System B einen besseren Schutz gegen abrasiven Angriff bietet.

### Generation 3:

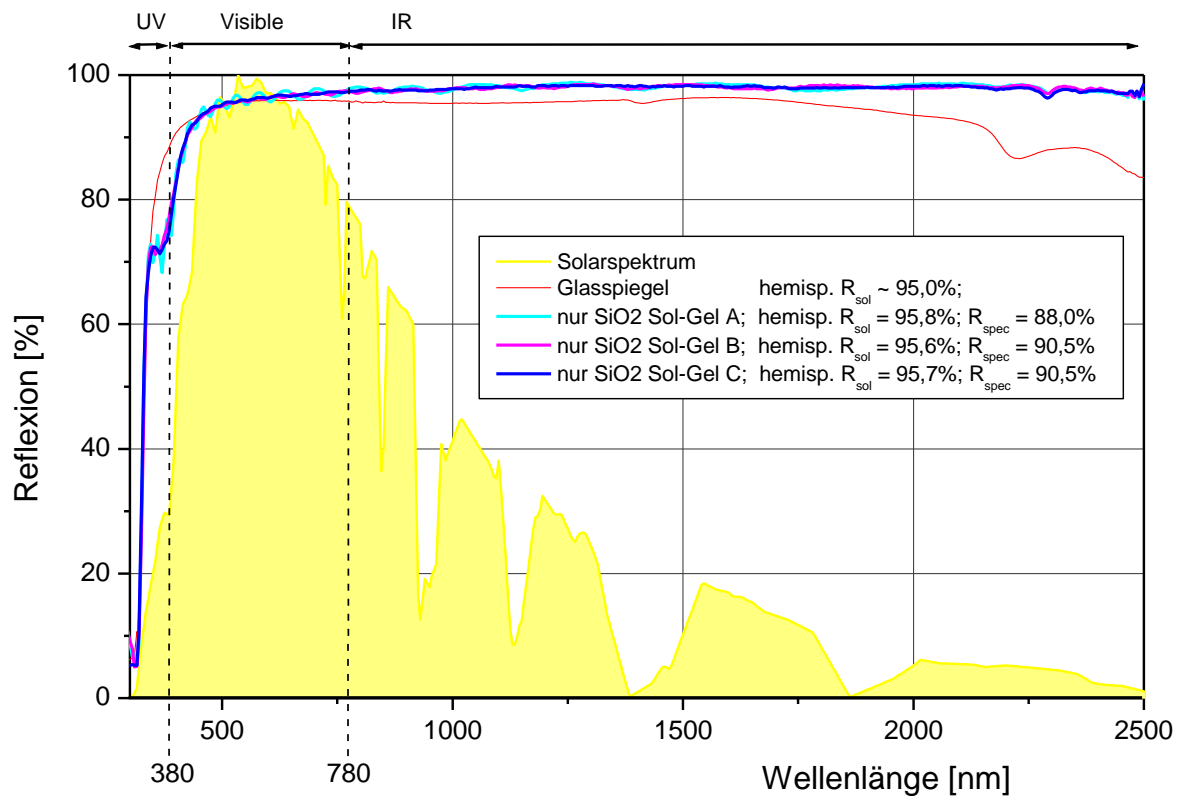
Die in AP 1.3.6.1 hergestellten Schichtsysteme mit verschiedenen Deckschichten nur aus SiO<sub>2</sub> und LI-HI Schichtsysteme aus SiO<sub>2</sub> + Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; SiO<sub>2</sub> + ZrO<sub>2</sub> und SiO<sub>2</sub> + ZAO, wurden anschließend mit allen drei neuen Sol-Gel Systemen beschichtet.

Auch mit diesen Schichtsystemen konnte ein hemisphärischer solare-gewichteter Reflexionsgrad von über 95% und zusätzlich eine hohe gerichtete Reflexion erreicht werden (siehe Tabelle 1.3.9 und Grafiken 1.3.19 bis 1.3.22). Somit ist die Reflexionsleistung dieser Schichtsysteme sogar etwas höher als bei Glasspiegeln.

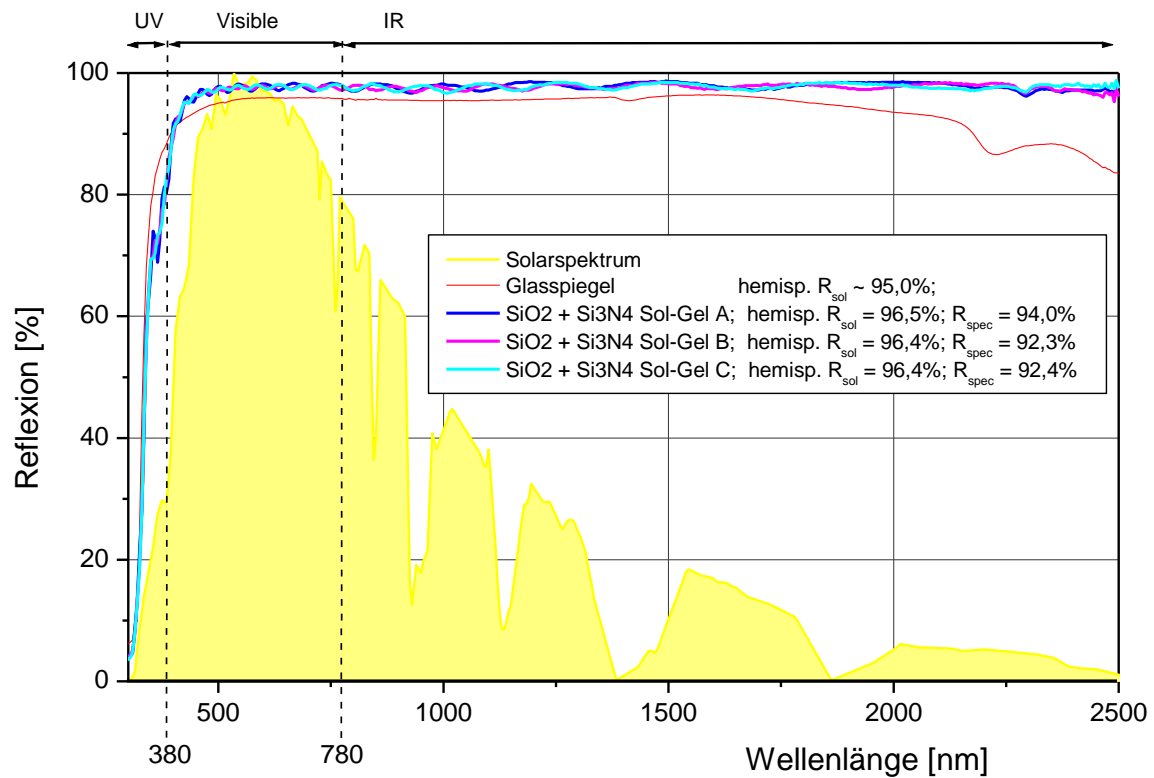
Daneben ist bemerkenswert, dass sich die Reflexionswerte der mit Sol-Gel Schutzschicht beschichteten PVD Schichtsysteme nicht signifikant von den Reflexionswerten der entsprechenden PVD Schichtsystemen ohne Sol-Gel Schutzschicht unterscheiden (siehe Tabelle 1.3.5). D. h. es findet so gut wie keine Absorption in den verwendeten Sol-Gel Systemen statt. Das heißt, dass eine sehr gute Qualität der Sol-Gel Beschichtungen erreicht wurde.

Gemessene Reflexion im Neuzustand in %					
Probe	top layer	sol-gel	$\rho_{s,h}([280,2500],8^\circ,h)$	$\rho_{\lambda,h}(660nm,8^\circ,h)$	$\rho_{\lambda,\varphi}(660nm,15^\circ,12.5\text{ mrad})$
CS3GEB24	SiO2	A	95,8 ± 0,1	96,5 ± 0,3	88,0 ± 0,4
CS3GEB32	SiO2	C	95,7 ± 0,1	96,7 ± 0,1	90,5 ± 0,3
CS3GEB36	SiO2	B	95,6 ± 0,2	96,9 ± 0,4	90,5 ± 0,4
CS3GEB25	ZAO	A	96,3 ± 0,1	96,5 ± 0,1	90,7 ± 0,1
CS3GEB33	ZAO	C	95,9 ± 0,2	97,4 ± 0,5	92,7 ± 0,4
CS3GEB37	ZAO	B	96,1 ± 0,1	97,2 ± 0,2	92,7 ± 0,4
CS3GEB26	ZrO2	A	96,7 ± 0,0	97,8 ± 0,1	93,5 ± 0,2
CS3GEB34	ZrO2	C	96,6 ± 0,0	97,7 ± 0,1	92,2 ± 0,3
CS3GEB38	ZrO2	B	96,6 ± 0,0	97,7 ± 0,1	92,1 ± 0,3
CS3GEB27	Si3N4	A	96,5 ± 0,0	98,1 ± 0,1	94,0 ± 0,1
CS3GEB35	Si3N4	C	96,4 ± 0,0	97,4 ± 0,1	92,4 ± 0,7
CS3GEB39	Si3N4	B	96,4 ± 0,0	97,5 ± 0,2	92,3 ± 0,2
Mittelwert			96,2 ± 0,4	97,3 ± 0,5	91,8 ± 1,6

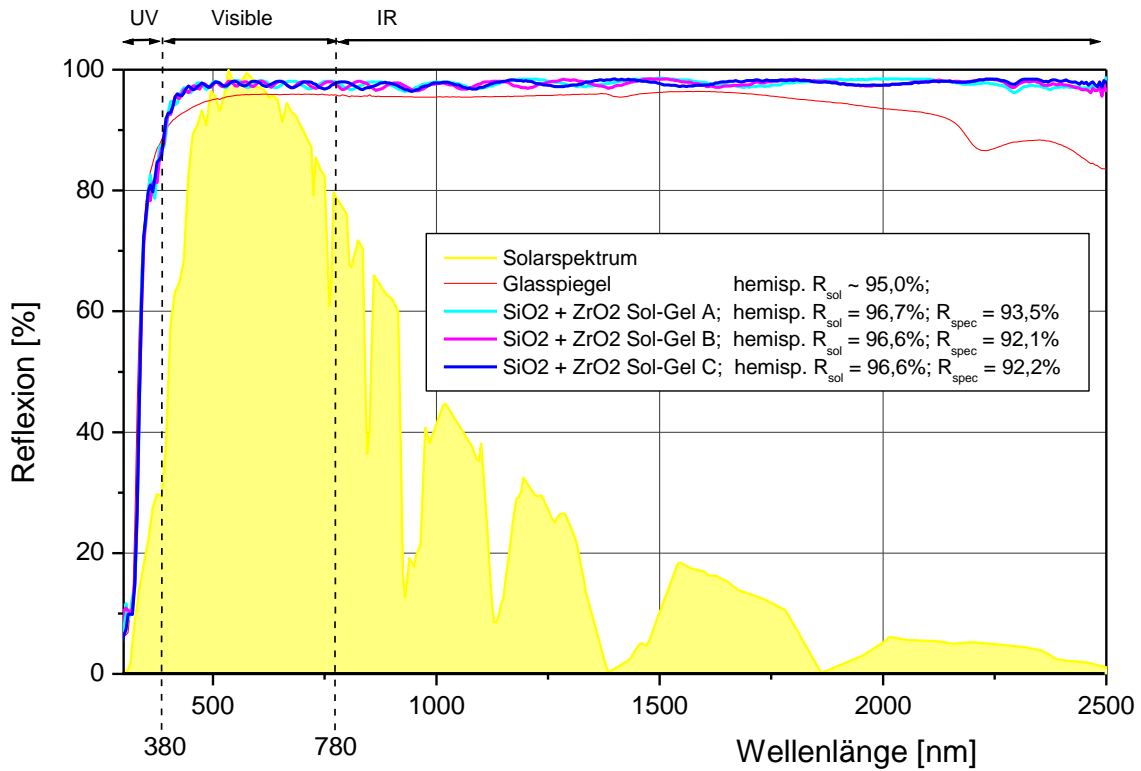
Tabelle 1.3.9: Optische Kennwerte der hergestellten Schichtsysteme der Generation 3 mit verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen.



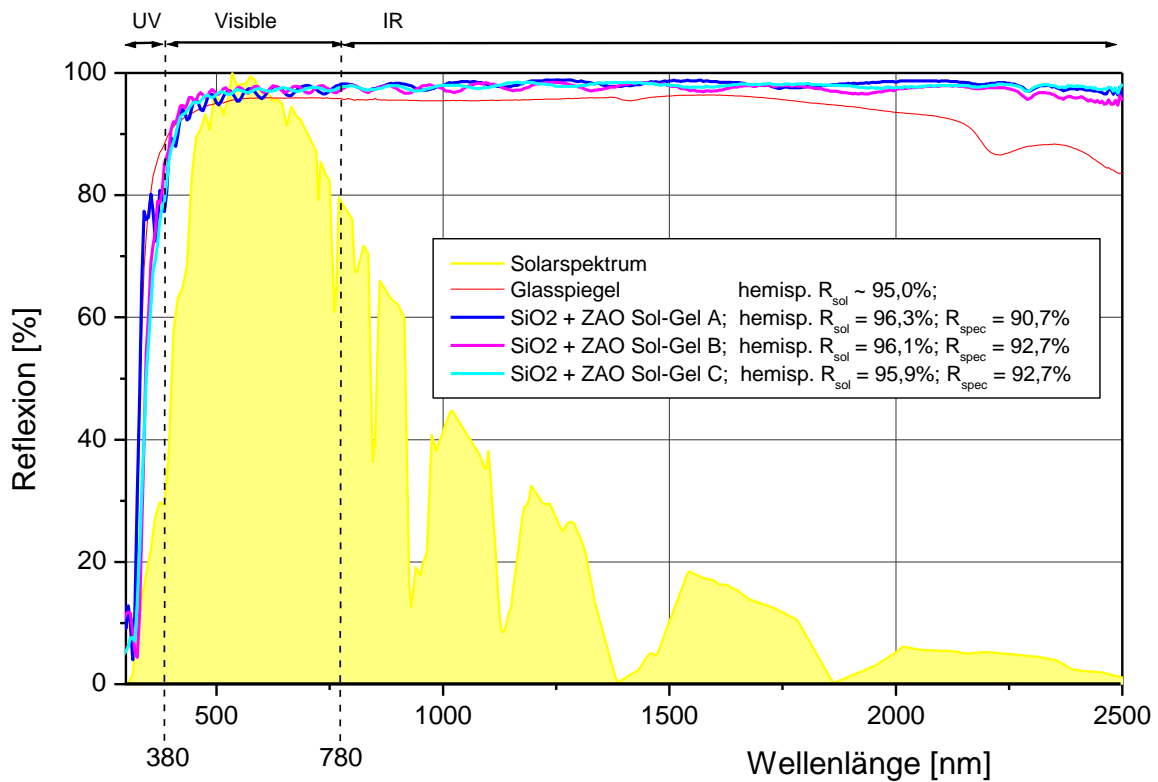
Grafik 1.3.19: Reflexionsspektren der Schichtsystem nur mit SiO<sub>2</sub> Deckschicht (154nm) und verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen



Grafik 1.3.20: Reflexionsspektren des Schichtsystems mit SiO<sub>2</sub>+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Deckschichten und verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen



Grafik 1.3.21: Reflexionsspektren des Schichtsystems mit SiO<sub>2</sub>+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Deckschichten und verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen



Grafik 1.3.22: Reflexionsspektren des Schichtsystems mit SiO<sub>2</sub> + ZAO Deckschichten und verschiedenen Sol-Gel Beschichtungen.

Die Schichtsysteme der Generation 3 wurden ebenfalls dem 3Y Coastal Degradationstest unterworfen. In Tabelle 1.3.10 sind die Testergebnisse zusammengefasst.

Gemessene Reflexion im Neuzustand und nach 3Y Coastal Test in %								
Probe	top layer	sol-gel	$\rho_{s,h}([280,2500], 8^\circ, h)$			$\rho_{\lambda,\varphi}(660nm, 15^\circ, 12.5 mrad)$		
			neu	nach 3YC	$\Delta$	neu	nach 3YC	$\Delta$
CS3GEB24	SiO2	A	95,80	94,53	-1,27	88,00	79,20	-8,80
CS3GEB32	SiO2	C	95,70	95,33	-0,37	90,50	86,25	-4,25
CS3GEB36	SiO2	B	95,60	94,82	-0,78	90,50	85,35	-5,15
CS3GEB25	ZAO	A	96,30	91,36	-4,94	90,70	76,15	-14,55
CS3GEB33	ZAO	C	95,90	95,89	-0,01	92,70	80,52	-12,18
CS3GEB37	ZAO	B	96,10	95,32	-0,78	92,70	76,87	-15,83
CS3GEB26	ZrO2	A	96,70	95,89	-0,81	93,50	84,05	-9,45
CS3GEB34	ZrO2	C	96,60	96,65	0,05	92,20	87,02	-5,18
CS3GEB38	ZrO2	B	96,60	96,33	-0,27	92,10	83,83	-8,27
CS3GEB27	Si3N4	A	96,50	95,57	-0,93	94,00	86,65	-7,35
CS3GEB35	Si3N4	C	96,40	96,21	-0,19	92,40	88,93	-3,47
CS3GEB39	Si3N4	B	96,40	96,48	0,08	92,30	89,47	-2,83

Tabelle 1.3.10: Degradationsergebnisse nach 3Y Coastal Test der Schichtsysteme der dritten Generation.

Daraus geht hervor, dass das Schichtsystem mit der ZAO Schicht unabhängig von der verwendeten Sol-Gel Beschichtung am schnellsten degradiert. Die geringste Degradation zeigt das Schichtsystem mit der Si3N4 Deckschicht.

Daneben kann man der Tabelle 1.3.10 entnehmen, dass die Sol-Gel Beschichtung Typ B und C den besten Korrosionsschutz bieten.

Von allen getesteten Schichtsystemen der 1., 2. und 3. Generation erweist sich Schichtsystem Gen 3 B mit Si3N4 Deckschicht (siehe Tabelle 1.3.5) und Sol-Gel Schutzschicht Typ B am stabilsten im 3Y Coastal Test.

#### AP 1.3.6.3 Optimierung der Oberfläche von Sol – Gel Schichten durch Aufbringen von PVD basierten Funktionsschichten.

Nach einigen Vorversuchen konnte keine ausreichende Haftung von PVD Schichten auf den verwendeten Sol-Gel schichten erzielt werden. Daher wurden diese Versuche eingestellt, zumal auch schon gute Ergebnisse ohne eine zusätzliche PVD Schicht erzielt wurden.

## 10. Messung der optischen Reflexionseigenschaften/Benchmarking

### 10.1.1 Messmethodik

Reflexionsgradmessungen werden nach der aktuellen SolarPACES reflectance measurement guideline [1] durchgeführt. Der spektrale hemisphärische sowie der gerichtete Reflexionsgrad werden in der Regel bestimmt. Die Nomenklatur basiert auf der Norm UNE 206009:2013 [2].

#### Hemisphärischer Reflexionsgrad $\rho_{s,h}$

Der hemisphärische Reflexionsgrad wird im Wellenlängenbereich von  $\lambda = [320, 2500]$  nm gemessen, mit 5 nm Intervallen bei einem Einfallswinkel von  $\theta_i = 8^\circ$  mit dem Perkin-Elmer Lambda 1050 Fotospektrometer mit einer Integrationskugel mit einem Durchmesser von 150 mm. Die Daten werden mit einem 2nd surface Referenz-Standard gewichtet (kalibriert im Bereich von 320-2500 nm). Drei Messungen werden in der Regel auf jeder Probe genommen, dabei werden die Proben zwischen den Messungen um jeweils  $90^\circ$  gedreht.

Dem ASTM Standard E903-82 (92) [3] folgend, wird der solargewichtete hemisphärische Reflexionsgrad  $\rho_{s,h}$  berechnet, indem der spektrale hemisphärische Reflexionsgrad  $\rho_{\lambda,h}(\lambda, \theta_i, h)$  mit der direkten solaren Einstrahlung  $G_b$  auf der Erdoberfläche für jede Wellenlänge gewichtet wird, nach Gleichung 1:

$$\rho_{s,h} = \frac{\int_{320nm}^{2500nm} \rho_{\lambda,h}(\lambda, 8^\circ, h) \cdot G_b(\lambda) d\lambda}{\int_{320nm}^{2500nm} G_b(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

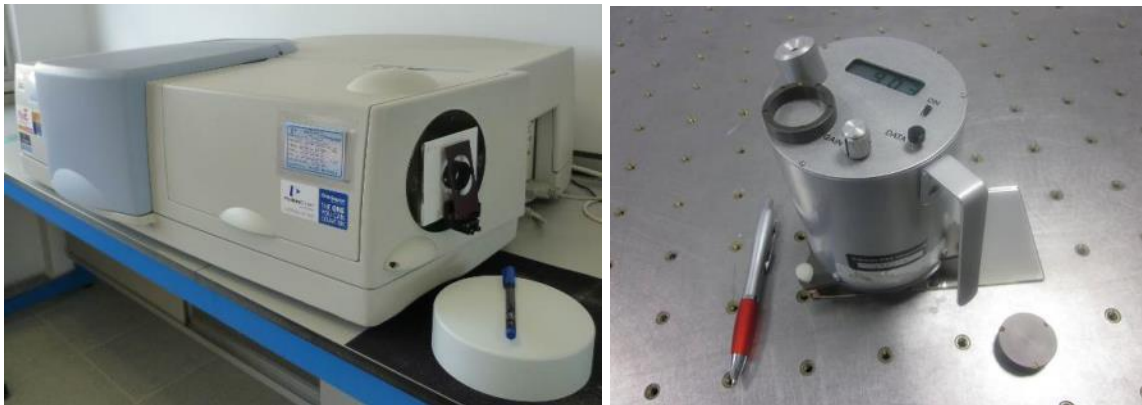
Für europäische und nordamerikanische Breitengrade sind typische Einstrahlungsspektren im aktuellen Standard ASTM G173-03 [4] (direkte Einstrahlung) für eine air mass AM 1.5 gegeben. Der dort beinhaltete Wellenlängenbereich der solaren spektralen Einstrahlung ist  $\lambda = [280, 4000]$  nm. Weil der ferne und mittlere UV-Bereich nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf  $\rho_{s,h}$  hat, kann der gemessene Messbereich auf  $\lambda = [320, 2500]$  begrenzt werden.

Angegeben wird oft auch noch der hemisphärische Reflexionsgrad bei 660 nm, der Wellenlänge bei der auch der gerichtete Reflexionsgrad gemessen wird. Durch den Vergleich dieser beiden Werte, lässt sich eine Aussage treffen wie stark der gerichtete vom hemisphärischen Reflexionsgrad abweicht.

#### Gerichteter Reflexionsgrad $\rho_{\lambda,\varphi}$

Der monochromatische gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_{\lambda,\varphi}$  wird innerhalb eines Akzeptanzwinkels von  $\varphi = 12.5$  mrad mit einem Devices & Services 15R-USB Reflektometer gemessen. Das Instrument nutzt einen parallelen Strahl mit einem Einfallswinkel von  $\theta_i = 15^\circ$  und einem Wellenlängenbereich zwischen 635 und 685 nm, mit einem Maximalwert bei 660 nm.

Der gerichtete Reflexionsgrad ist der relevante Wert für CSP Technologien und der Akzeptanzwinkel wird als angemessen angesehen für Parabolrinnen-Designs üblicher Ausmaße. Proben werden in der Regel bis zu fünfmal gemessen und der Mittelwert gebildet. In der folgenden Darstellung sind die eingesetzten Messgeräte dargestellt (links: Lambda 1050, rechts: D&S 15R-USB)



Grafik 5: links: Lambda 1050, rechts: D&S 15R-USB

- [1] SolarPACES Reflectance Guideline: Parameters and Method to Evaluate the Reflectance Properties of Reflector Materials for Concentrating Solar Power Technology Technology. Version 3.0. March 2018. [http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/20180320\\_SolarPACES-Reflectance-Guidelines-V3.pdf](http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/20180320_SolarPACES-Reflectance-Guidelines-V3.pdf)
- [2] UNE 206009:2013. Solar Thermal Electric Plants. Terminology. 2013
- [3] ASTM E903-82. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, ASTM International, 2012.
- [4] ASTM G173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, 2003.

### 10.1.2 Charakterisierung der Sandwichproben

Wie im vorigen Kapitel beschrieben ist der gerichtete Reflexionsgrad der aussagekräftigste Wert. Dieser wurde deshalb für die Sandwichproben, die im Zuge des AP1.4 untersucht werden hinsichtlich der Beständigkeit der Klebeverbindung, gemessen. Das Material wurde dabei vor und nach dem Aufkleben auf den Betonkörper gemessen. Das heißt zuerst wurde das Reflektormaterial als solches gemessen und dann noch mal das fertige Sandwich aus Betonkörper und Reflektor.

Zwischen beiden Messungen wurden keine nennenswerten Abweichungen festgestellt die außerhalb der Messungenauigkeit des Equipments lag. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das Aufkleben keinen negativen Einfluss auf den gerichteten Reflexionsgrad hat. Für die weitere optische Charakterisierung, auch im Zuge des AP1.4, wurden die Messungen deshalb an den verschiedenen Varianten des bloßen Reflektormaterials durchgeführt.

### 10.1.3 Benchmarking

Die im Consol-Projekt neuentwickelten Reflektormaterialien sollen für eine Bewertung mit den heutzutage üblicherweise eingesetzten Materialien verglichen werden. Als Neuentwicklung wird hierfür das Material CS3GEB39 aus der dritten Generation gewählt. Dieses zeigte in den Alterungsversuchen im AP1.4 die höchste Beständigkeit und ist auch bei den Reflexionseigenschaften eines der besten Materialien. Als Benchmark-Materialien werden zum Vergleich kommerziell erhältliche Glasspiegel mit üblichen Glasstärken von 1 mm bzw. 4 mm herangezogen. Außerdem wird eines der Aluminiummaterialien aus dem Alumir-Projekt als Ausgangspunkt gewählt um die Verbesserung aufzuzeigen die im Laufe des Projektes erzielt wurde.

In Tabelle 2 sind die Reflexionsgrade für diese vier Materialien im Ausgangszustand präsentiert.

Material	$\rho_{s,h}([280,2500],8^\circ,h)$	$\rho_{\lambda,h}(660nm,8^\circ,h)$	$\rho_{\lambda,s}(660nm,15^\circ,12.5mrad)$
1mm Glasspiegel	0.956	0.965	0.965
4mm Glasspiegel	0.944	0.957	0.950
CS3GEB39	0.964	0.975	0.923
Alumir F	0.897	0.906	0.826

Tabelle 2: Reflexionsgrade der vier zu vergleichenden Materialien

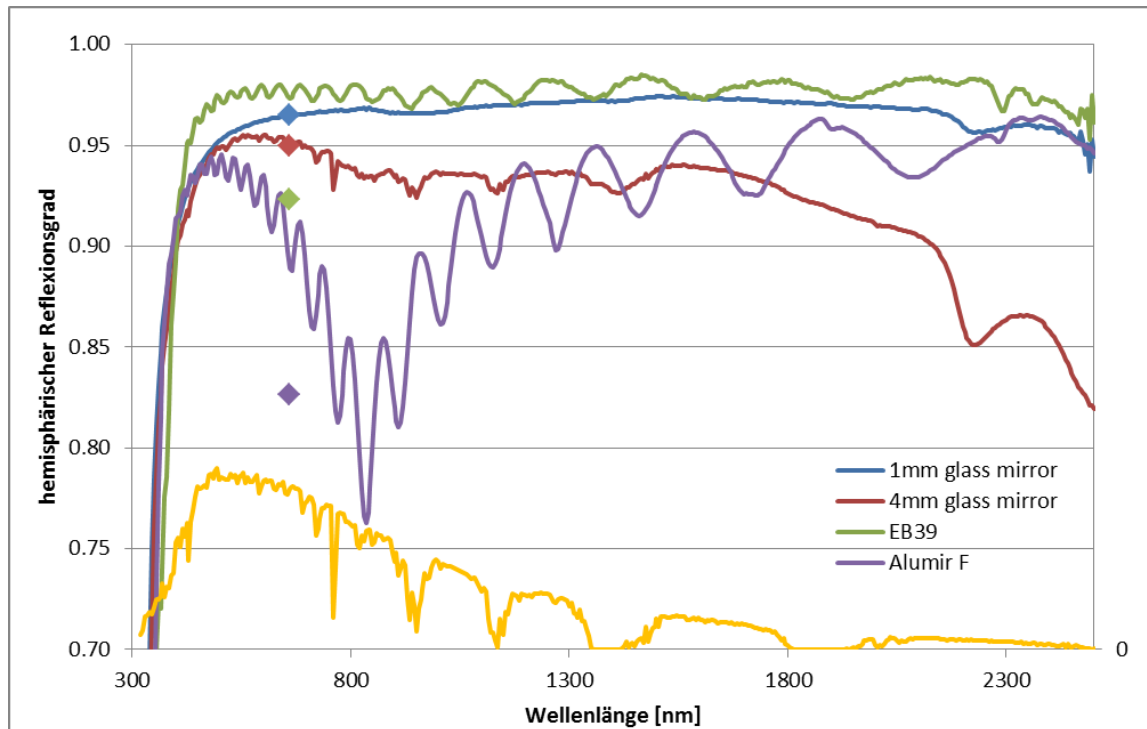
Vor allem im Vergleich zu dem alten Material aus dem Alumir-Projekt zeigt sich eine starke Verbesserung der optischen Eigenschaften. Der solargewichtete hemisphärische Reflexionsgrad des Materials CS3GEB39 ist 6,7 ppt höher und der gerichtete Reflexionsgrad sogar 9,7 ppt als beim alten F-Material. Hier zeigt sich der Vorteil des Einsatzes von Silber als Reflektormaterial im Vergleich zu Aluminium, da ersteres eine deutlich bessere Reflexion im solaren Bereich ermöglicht.

Der hemisphärische Reflexionsgrad des neuen Materials ist sogar deutlich höher als bei den heutzutage eingesetzten Glasspiegeln, mit einer Differenz von 0,8 ppt zu den 1 mm Spiegeln und 2,0 ppt zu den 4 mm Spiegeln. Dies liegt vor allem daran, dass die Schutzschichten über der Reflektorschicht im Falle des Consol-Materials deutlich dünner sind (wenige  $\mu m$  im Vergleich zu Millimetern im Falle von Glas). Dies führt dazu, dass bei den Glasspiegeln deutlich mehr Strahlung in diesen Schutzschichten absorbiert wird.

Für den gerichteten Reflexionsgrad, und dieser ist für CSP-Anwendungen entscheidend, sieht die Situation anders aus. Dieser liegt wie beschrieben deutlich über dem alten Aluminium-Material, was eine deutliche Verbesserung bedeutet, aber dennoch unter dem der Glasspiegel. Die Differenz beträgt hier 2,7 ppt zu den 4 mm und 4,2 ppt zu den 1 mm Spiegeln. Dies erklärt sich dadurch, dass die Reflektoroberfläche bei den Consol-Materialien herstellungsbedingt deutlich rauer ist als bei diesen Glasspiegeln. Das führt zu einer höheren Streuung an der Oberfläche aber nicht zu einer höheren Absorption.

In der folgenden Grafik sind die hemisphärischen Reflexionsgradspektren der vier Materialien dargestellt. Die durchgehenden Linien zeigen den hemisphärischen Reflexionsgrad und zusätzlich ist der gerichtete Wert bei 660 nm als gleichfarbige Raute dargestellt. In diesem

Schaubild ist deutlich der Vorteil des neuentwickelten Materials beim hemisphärischen Reflexionsgrad zu sehen, aber auch die Nachteile beim gerichteten Reflexionsgrad für die Aluminium-Reflektoren. Im Falle der Glasspiegel liegt der gerichtete Werte quasi auf der jeweiligen Kurve (gerichteter gleich hemisphärischer Reflexionsgrad), im Falle der Aluminium-Varianten liegen die gerichteten Werte deutlich niedriger (stärkere Streuung). Als Referenz ist noch das Spektrum der solaren Einstrahlung dargestellt um die wichtigeren Wellenlängenbereiche identifizieren zu können.



Grafik 6: Spektren hemisphärischer Reflexionsgrad, sowie gerichteter Wert der MaterialienI, mit solarem Spektrum zum Vergleich

Hinsichtlich der Beständigkeit kann davon ausgegangen werden, dass gute Glasspiegel bei Exposition für drei Jahre an einem Küstenstandort bzw. 10 Jahren an einem Wüstenstandort nur vernachlässigbare Degradation aufweisen (gerichteter Reflexionsgradverlust unter 1%, nur minimale Korrosion der Silberschicht). Das oben genannte Material CS3GEB39 wurde in der Prozedur die 3 Jahre an einem Küstenstandort simulieren soll, getestet. Bei Durchlaufen der Prozedur traten schon recht deutliche Degradationserscheinungen, vor allem Pitting-Korrosion, auf. Siehe auch der Bericht zu AP1.4. Es ist jedoch zu betonen, dass dies noch keinen extremen Einfluss auf den gerichteten Reflexionsgrad hat, dieser sinkt um 2,8 ppt.

Die Prozedur zur Simulation von 10 Jahren an einem Wüstenstandort wurde für zwei Materialien der zweiten Generation durchgeführt. Auch hier traten recht deutliche Degradationseffekte auf. Bei dem besseren der beiden Materialien beschränkte der Abfall des gerichteten Reflexionsgrades jedoch auf 2,9 ppt, was als durchaus annehmbares Ergebnis bewertet werden kann. Vor allem stellen die Ergebnisse sehr deutliche Verbesserungen zu den vor dem Projekt erhältlichen Aluminium-basierten Materialien dar.



# ConSol

## Concrete Solar Collector

### Bericht AP 1.4

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeico GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Mögliche Kandidaten für das Reflektormaterial .....	3
4. Lebensdauerabschätzung auf Basis kombinierter Belastungstests .....	4
4.1 Testprozedur .....	5
4.2 Testergebnisse 1. Generation .....	6
4.3 Ergebnisse 2. Generation.....	9
4.4 Ergebnisse 3. Generation.....	12
5. Identifizierung langzeitstabiler Klebeverbindungen .....	15
6. Konzeptentwicklung für eine fertigungsintegrierte Qualitätsüberwachung .....	18
6.1 Typische Parameter zur Beschreibung der Formtreue von Parabolrinnen(modulen) 19	
6.2 Qualifizierungsmethoden zur Formmessung .....	21
6.3 Konzept für Feldfabrik .....	26
7. Charakterisierung der hochreflektierenden Schichtsysteme .....	29

# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	21.01.2016	Johannes Wette	Anfangsversion, Vorlage
2	29.04.2016	Johannes Wette	Kapitel 3, 4 erstellt
3	22.06.2017	Johannes Wette	Kapitel 4 erweitert
4	16.05.2018	Johannes Wette	Überarbeitung, Komplettierung Daten
5	01.06.2018	Johannes Wette	Erweiterung 4.5, Fertigstellung
6	11.07.2018	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung

**Tabelle 1.4.1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 1.4.

Die im Laufe des Projektes hergestellten Reflektorvarianten mit unterschiedlichen Schichtsystemen auf einem Aluminiumsubstrat wurden in beschleunigten Alterungstests geprüft und ihre Reflektivität vor sowie nach den Tests vermessen.

Im Vergleich zu aluminiumbasierten Proben, die bei Almeco zu Beginn des Projektes zur Verfügung standen wurde die solar gewichtete, gerichtete Reflektivität von 82,6% auf 92,3% erhöht, also fast um 10%-Punkte.

Aussichtsreiche Materialien wurden hinsichtlich ihrer Beständigkeit untersucht. Zwar gibt es noch Aufholbedarf im Vergleich zu Glas-Silberspiegeln, aber es wurden deutliche Fortschritte erzielt bei Alterungstests, die Wüsten- und Küstenstandorte simulieren, im Vergleich zum Stand zu Projektbeginn.

Für die Befestigung des Spiegels am Beton wurde ein doppelseitiges Klebeband der Firma TESA ausgewählt. Das Substrat des Klebebandes ist ein PE-Schaum der auf beiden Seiten mit einem modifizierten Akrylatkleber beschichtet ist. Sowohl auf dem Beton als auch auf den unterschiedlich beschaffenen Aluminiumoberflächen wies das Material eine sehr gute Haftung auf. Um die Verklebung zu testen, wurde das Material auf dem Demonstrator aufgebracht und auch nach längerem Außeneinsatz und zyklischen Feuchte- und Temperaturtests wurden keine Probleme der Verbindung festgestellt. Alle Tests verliefen positiv, das Reflektormaterial hat sich nicht gelöst.

## 3. Mögliche Kandidaten für das Reflektormaterial

Eines der Ziele des ConSol-Projektes ist es, die Aluminiumreflektormaterialien weiterzuentwickeln (AP1.3). Bisherige kommerzielle Produkte auf Aluminiumbasis haben das Problem, dass sowohl der Reflexionsgrad als auch die Haltbarkeit der Materialien deutliche Defizite aufweisen.

Die Firma Almeco wird deshalb vor allem an der Weiterentwicklung ihrer aluminiumbasierten Reflektoren arbeiten. Dafür soll als reflektierende Schicht Silber, anstatt wie bisher hochreines Aluminium, verwendet werden. Dies ist eine Variante die bisher nur für die Innenraumanwendung verfügbar ist. Um dies auch für den Außeneinsatz nutzen zu können müssen sowohl die Aufbringung der Silberschicht als auch deren Schutz durch die darüber liegenden Deckschichten verbessert werden.

Da bei Projektbeginn nicht sicher ist, ob die Ziele hinsichtlich der Verbesserung erreicht werden, wird parallel dazu der Einsatz von alternativen Materialien untersucht. Als Alternativen zu den Aluminiumreflektoren sind verschiedene Varianten denkbar. Kommerziell erhältlich sind davon vor allem zwei: Dünnglasspiegel (Dicke ca. 1 mm) und polymerfilmbasierte Spiegelmaterialien.

Einziger verfügbarer Hersteller von Dünnglasspiegeln ist zurzeit die Firma AGC. Aus einem alten bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt ist noch Dünnglas-Material auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) vorhanden, welches bei der Firma Guardian gekauft wurde. Diese Spiegel werden aber nicht mehr vertrieben. Für erste Klebeversuche wurde Material der Guardian-Spiegel an die Universität Kaiserslautern geschickt.

Die Verfügbarkeit von AGC-Material ist auch relativ unklar, da die Dünnglasspiegel nicht immer und durchgehend produziert werden und nur vertrieben werden wenn relativ große Chargen für kommerzielle Kraftwerksprojekte hergestellt werden.

Weiterhin ist unklar ob zusätzliche Hersteller auf dem Markt sind (z.B. Naugatuk, Reflex aus Italien).

Hersteller von Polymerfolien-Reflektoren ist im Moment einzig SkyFuel (Markenname des Reflektormaterials Reflectech Plus). Kontakt mit der Firma wurde hergestellt. Für das Projekt konnte kein Material geliefert werden, da der zu entwickelnde Kollektor von den Parametern zu ähnlich zu SkyFuels eigenem kommerziellem Kollektor ist und damit als direkte Konkurrenz gesehen wird. Für eine spätere kommerzielle Nutzung könnte das Material dennoch in Frage kommen.

Ultra-Thin-Glass: In einem weiteren Projekt wird mit der Firma Corning zusammengearbeitet. Diese sind auf Spezialgläser (unter anderem für Displays von Smartphones und Bildschirmen) spezialisiert und möchten auf ein extrem dünnes Glas (flexibel) mit ca. 100 µm Dicke, ein Standardschichtsystem aufbringen, ähnlich wie herkömmliche Glasspiegel, eventuell mit Glas auf die Rückseite laminiert. Dies wurde im Forschungsprojekt auch erfolgreich durchgeführt. Von einer kommerziellen Verfügbarkeit ist das Produkt aber noch weit entfernt.

Die Firma Ibiden bietet bereits kommerziell einen Spiegel an der auf der Vorderseite von einer sehr dünnen Siliziumcarbid (SiC) Schicht geschützt wird. Das Substrat ist eine Art Kunststoff. Bisher existieren keine Erfahrungen mit diesem Material. Parameter wie Reflexionsgrad oder mechanische Flexibilität sind unklar.

## **4. Lebensdauerabschätzung auf Basis kombinierter Belastungstests**

Von der Firma Almeco wurden im Laufe des Projektes verschiedene Reflektorvarianten hergestellt. Bei allen Varianten handelt es sich um unterschiedliche Schichtsysteme auf einem

Aluminiumsubstrat. Diese Varianten wurden mit der im Alumir-Projekt entwickelten Testprozedur getestet. Siehe für Details die Guideline:

[http://www.solarpaces.org/images/2016\\_AluminumReflectorDurability.pdf](http://www.solarpaces.org/images/2016_AluminumReflectorDurability.pdf)

Die erste Charge an Proben umfasste vier Materialien:

- EB1604.1: Standard Schichtsystem mit Sol-Gel A
- EB1604.2: Standard Schichtsystem mit Sol-Gel B
- EB1604.1: System mit Silber und Sol-Gel A
- EB1604.1: System mit Silber und Sol-Gel B

Tiefergehende Details zum Schichtaufbau der getesteten Materialien sind im Dokument zu AP1.3 zu finden.

Es standen von jedem Material jeweils 3 Proben ca. 15x20 cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Die maximale Größe für den Test wird vor allem durch den durchzuführenden UV/Kondensations-Test definiert. Die Probenhalterungen dieser Kammer erlauben eine maximale Breite von 10 cm. Die Proben werden dementsprechend zurechtgeschnitten.

Die Proben werden erst optisch charakterisiert und durchlaufen dann die Testprozedur. Bei der optischen Charakterisierung wird der hemisphärische Reflexionsgrad von 280 bis 2500 nm und der gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_{\lambda,\varphi}$  bei 660 nm gemessen. Aus den hemisphärischen Daten wird der solargewichtete hemisphärische Reflexionsgrad  $\rho_{s,h}$  bestimmt. Bei Bedarf werden Aufnahmen der Oberfläche mit dem Lichtmikroskop gemacht. Nach Durchlaufen der Prozedur wird die Charakterisierung wiederholt um das Absinken der Werte zu bestimmen. Außerdem werden Fotos der Spiegeloberfläche gemacht um die makroskopisch sichtbare Degradation zu verfolgen und zu analysieren.

Im Zuge des Projektes wurden insgesamt drei Generationen der Aluminium-Reflektormaterialien getestet. Die Erste umfasste zwei Materialien mit Aluminium-Reflexionsschicht und zwei mit Silber-Reflexionsschicht. Bei der zweiten Generation wurden sechs Materialien mit Silberschicht getestet. Der Einsatz von Silber als Reflexionsschicht scheint erforderlich um annehmbar hohe Reflexionsgrade zu erreichen und deshalb wurde der Fokus auf diese Varianten gelegt. Als dritte Generation wurden weitere 12 Materialien mit Silberschicht getestet und zusätzlich eine Version aus der 2. Generation. Diese wurde in einer industriellen Beschichtungsanlage hergestellt um festzustellen ob Unterschiede auftreten im Vergleich zur Herstellung im Labormaßstab.

## 4.1 Testprozedur

Wie im letzten Abschnitt beschrieben, wurde auf Ergebnisse aus dem Alumir-Projekt zurückgegriffen um Beständigkeitstest an den Materialien durchzuführen. Die gewählte Prozedur besteht aus einer Abfolge von verschiedenen beschleunigten Laboralterungstests um realistische Degradationsmechanismen zu aktivieren. Je nach gewähltem Einsatzort und Expositionsdauer ändern sich die Testparameter. In der folgenden Tabelle sind die Parameter für drei Standardexpositionsstandorte sowie die Dauern 3 und 10 Jahre dargestellt.

Für die erste Generation der Materialien wurde die Prozedur für „Coastal“ für 3 Jahre und 10 Jahre durchgeführt, da sie sehr aggressiv ist und so auf jeden Fall auswertbare Degradation erwartet wurde. Als Referenzproben wurden zusätzlich zwei Materialien aus dem Alumir-

Projekt mitgetestet bei denen bekannt war welche Art von Degradation durch die Tests hervorgerufen wird.

Vor und nach der Prozedur wurden der hemisphärische und der gerichtete Reflexionsgrad der Proben bestimmt sowie Fotos und Mikroskopbilder gemacht.

	Accelerated aging step		1	2	3	4
Method	Simulated reference site	Simulated Years	ISO9227: CASS Test [testing time in h]	DIN 52348: Sand trickling [sand mass in g]	ISO9227: CASS Test [testing time in h]	ISO 16474-3, Method A, cycle No. 1 [testing time in h]
A1	Extreme Desert	3	-	180	2	480
A2		10	-	600	8	480
B1	Desert	3	-	5	8	480
B2		10	-	15	24	480
C1	Coastal	3	96	5	8	480
C2		10	312	15	24	480

**Tabelle 1.4.4.1: Testparameter der Alterungsprozedur für Aluminiumreflektoren**

Die durchgeführten einzelnen Tests haben dabei die Aufgabe spezifische Degradationsmechanismen zu erzeugen. Für detaillierte Beschreibungen der Test und deren Parameter können die entsprechenden Normen konsultiert werden.

Der erste CASS Test erzeugt dabei die nur an Küstenstandorten nachgewiesene Pittingkorrosion. Der „Sand trickling“ Test erzeugt mechanische Defekte durch Erosion (Sandstürme, Partikel in der Luft). Der zweite CASS Test erzeugt Flächenkorrosion in der Reflektorschicht der Materialien und greift dabei an den punktuellen Schadensstellen des Erosionstests an. Der UV/Feuchte Test erzeugt in einigen Materialien einen Micropitting genannten Degradationsmechanismen bei dem mikroskopisch kleine Defekte in der Reflektorschicht entstehen.

Die Analyse der auftretenden Degradation und des Abfalls der Reflexionsgrade dient als Kriterium für eine Bewertung der neuentwickelten Beschichtungen und somit für die Auswahl vielversprechender Varianten für weitere Tests.

## 4.2 Testergebnisse 1. Generation

Es wurden die vier Materialien EB1641, EB1642, EB1643 und EB1644 getestet, zusammen mit den beiden Referenzmaterialien D und F. EB1643 und EB1644 sind Silbervarianten, die anderen Aluminiumvarianten.

In der folgenden Abbildung sind die Oberflächen der Proben der vier Materialien nach der Prozedur zu sehen. In der Tabelle sind die Reflexionsgrade vor und nach der Prozedur sowie der Verlust der Reflexionsgrade dargestellt, links der hemisphärische solar-gewichtete und rechts der gerichtete Reflexionsgrad.



EB1641



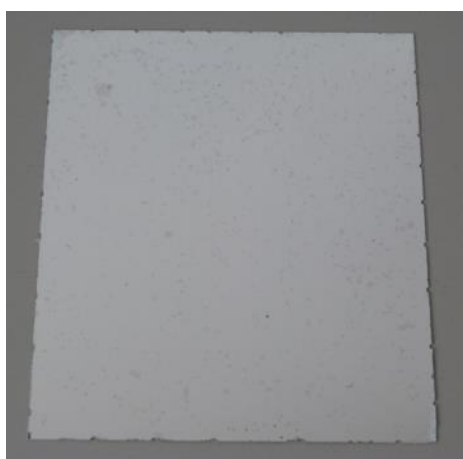
EB1642



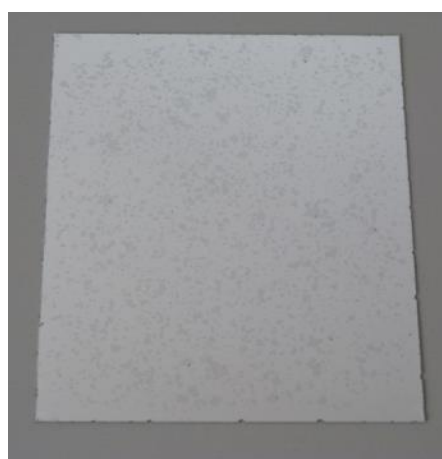
EB1643



EB1644



Alumir D



Alumir F

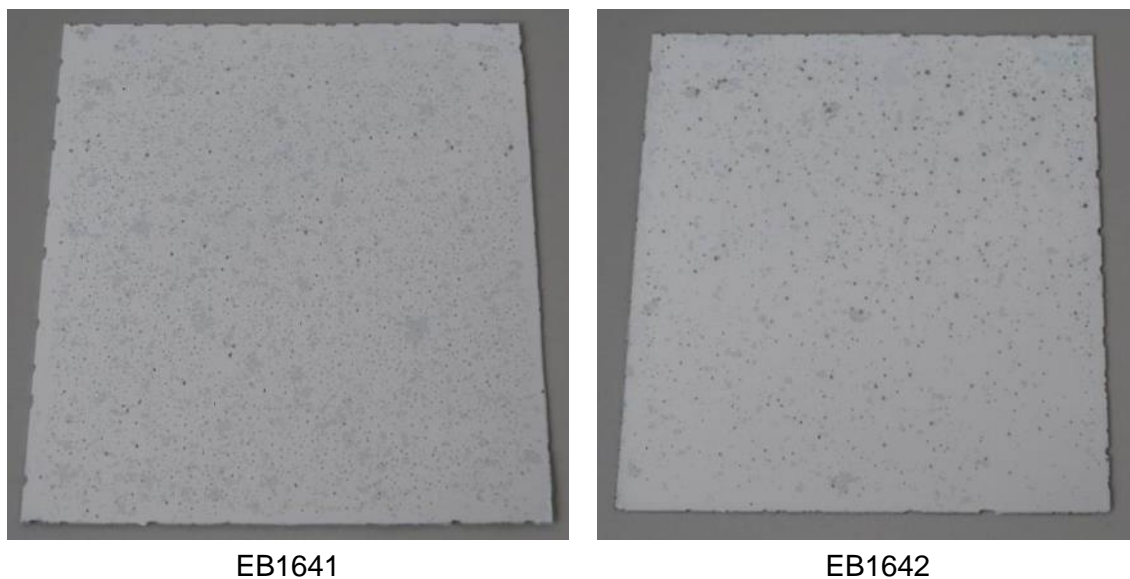
**Abbildung 1.4.4.1: Probenoberflächen der Proben der ersten Generation nach „3Y Coastal**

	Before	After 3Y	Drop (%)		Before	After 3Y	Drop (%)
Material		$\rho_{s,h}$				$\rho_{\lambda,\varphi}$	
EB1641	89,8	89,6	<b>0,2</b>		81,5	83,3	<b>-1,9</b>
EB1642	89,3	89,5	<b>-0,2</b>		84,5	84,5	<b>0,0</b>
EB1643	96,8	93,7	<b>3,1</b>		90,3	75,2	<b>15,1</b>
EB1644	96,4	94,2	<b>2,2</b>		90,3	72,8	<b>17,5</b>
Alumir D	89,9	88,1	<b>1,8</b>		78,2	70	<b>8,2</b>
Alumir F	89,8	87,4	<b>2,4</b>		83,0	74,4	<b>8,4</b>

**Tabelle 1.4.4.2: Reflexionsgrade vor und nach sowie deren Verluste nach „3Y Coastal“ der ersten Generation**

Es ist ersichtlich, dass die Degradation bei den Silbervarianten deutlich stärker ausgeprägt ist als bei den anderen Materialien. Es kommt zum Auftreten von mehr und größeren Pitting-Löchern und die Schutzschichten lösen sich recht großflächig von den Proben. Auch der Reflexionsgrad nimmt deutlich stärker ab. Beide neuen Aluminiumvarianten zeigen deutlich bessere Ergebnisse, auch im Vergleich zu den Referenzmaterialien aus dem Alumir-Projekt.

Da die Beschädigung der Silbervarianten schon nach der 3 Jahres-Prozedur sehr stark ist, wurde die 10 Jahres-Prozedur nur mit den Aluminiummaterialien durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind die Proben der beiden Materialien nach dem Test dargestellt, in der Tabelle wieder die Reflexionsgrade bzw. deren Verlust.



**Abbildung 1.4.4.2: Probenoberfläche der Aluminium-Varianten nach „10 Year Coastal“**

	Before	After	Drop (%)		Before	After	Drop (%)
		$\rho_{s,h}$				$\rho_{\lambda,\varphi}$	
EB1641	89,6	86,8	<b>2,8</b>		83,1	76,4	<b>6,6</b>



EB1642	89,4	87,5	<b>1,9</b>	83,5	77,5	<b>6,1</b>
Alumir D	89,9	86,4	<b>3,5</b>	81,8	51,9	<b>29,9</b>
Alumir F	89,9	85,2	<b>4,7</b>	83,0	59,3	<b>23,7</b>

**Tabelle 1.4.4.3: Reflexionsgrade vor und nach „10Y Coastal“ sowie Verluste der Aluminium-Varianten**

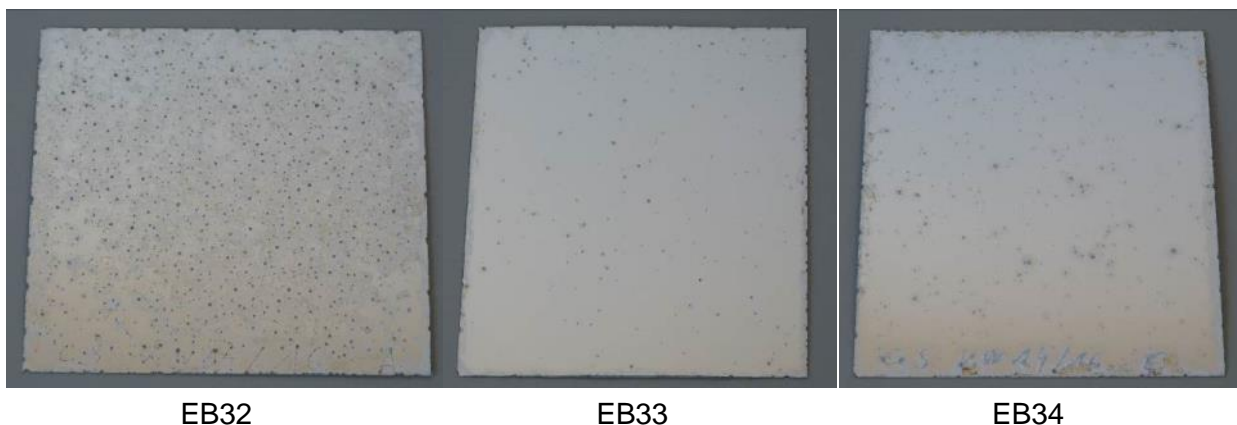
Beide Materialien zeigen wie erwartet deutliche Degradationserscheinungen. Wie man aber am Abfall des Reflexionsgrades sehen kann, besonders dem gerichteten, werden die Proben durch den Test deutlich weniger beschädigt als die älteren Varianten aus dem Alumir-Projekt. Bei diesen ist der Verlust deutlich höher.

### 4.3 Ergebnisse 2. Generation

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der ersten Testreihe wurden von Almeco neue Materialien produziert. Die Entwicklung dieser zweiten Generation zielte vor allem darauf ab die Beständigkeit der Materialien mit Silber-Reflexionsschicht zu verbessern. Die optischen Messungen der erste Generation zeigten, dass der Einsatz der Silberreflexionsschicht notwendig ist um eine ausreichend hohe Reflexion zu erzielen. Es wurden sechs Silbervarianten der „Coastal 3“ Jahres-Prozedur unterzogen.

Wieder sind Abbildungen der Proben nach dem Durchlaufen der Testprozedur dargestellt und in einer Tabelle die Reflexionsgrade und deren Abfall.

Die Ergebnisse der Materialien unterscheiden sich zum Teil recht deutlich voneinander. Vor allem die Anzahl der Pitting-Löcher und das Ausmaß des Ablösens der Schutzschichten sind von Material zu Material stark unterschiedlich. Die beiden Material 33 und 37 sind deutlich die beständigsten in dem Test. Dies spiegelt sich auch in den Reflexionsgraden wieder. Vor allem der hemisphärische Reflexionsgrad sinkt bei diesen beiden Materialien nur wenig, während er bei den anderen zwischen 1,5 und fast 7 Prozentpunkten absinkt. Beim gerichteten Reflexionsgrad ist das Ergebnis nicht ganz so eindeutig. Während das Material 37 den geringsten Abfall aller Materialien aufweist, ist er bei dem Material 33 höher als bei zwei anderen aber niedriger als bei den beiden Restlichen. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Werte für den gerichteten Reflexionsgrad auf fünf Messungen über die Probe verteilt beruhen und bei punktuellen Defekten relativ stark schwanken können.



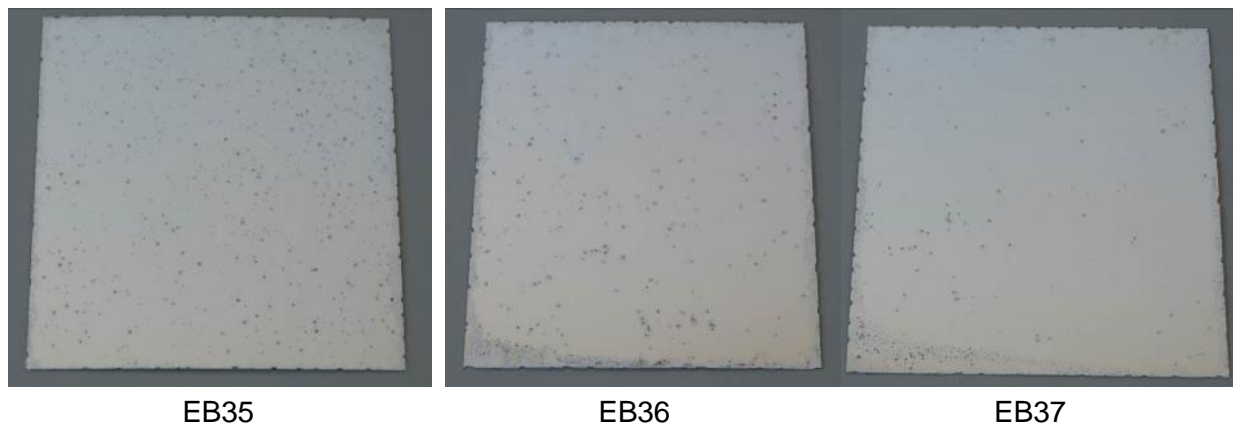


Abbildung 1.4.4.3: Probenoberflächen der Proben der zweiten Generation nach „3Y Coastal“

Material	Layers	Sol-Gel	Before	After 3Y	Drop (%)	Before	After 3Y	Drop (%)
			$\rho_{s,h}$			$\rho_{\lambda,\varphi}$		
EB32	NiCr-Ag	B	96,2	89,4	<b>6,8</b>	88,8	66,1	<b>22,6</b>
EB33	SS-Ag	B	96,4	96,2	<b>0,2</b>	90,8	80,2	<b>10,6</b>
EB34	NiV-Ag	B	96,5	94,2	<b>2,3</b>	90,3	74,4	<b>16,0</b>
EB35	NiCr-Ag	A	96,4	94,8	<b>1,5</b>	86,5	79,0	<b>7,5</b>
EB36	SS-Ag	A	96,5	94,3	<b>2,1</b>	91,2	84,7	<b>6,5</b>
EB37	NiV-Ag	A	96,5	96,0	<b>0,5</b>	90,8	85,8	<b>5,0</b>

Tabelle 1.4.4.4: Reflexionsgrade vor und nach sowie deren Verluste nach „3Y Coastal“ der zweiten Generation

Die ersten Ergebnisse für die Materialien 33 und 37 sind recht vielversprechend. Die Dichte und Größe der Pitting-Löcher ist zwar höher als bei neuen Materialien mit Aluminium-Reflexionsschicht, dafür entwickelt sich bei ihnen keine Flächenkorrosion. Um das Degradationsverhalten detaillierter zu untersuchen, sollen die beiden Materialien noch der Prozedur „Desert 10Y“ unterzogen werden. Des Weiteren dient das Durchführen der Prozedur als Nachweis der Lebensdauer von 10 Jahren dieser Materialien, dies ist einer der Meilensteine des AP1.4. Siehe für die Parameter die Tabelle der Testparameter am Anfang des Kapitels. Gerade durch den Wegfall des ersten Langzeit-CASS-Tests, der in der Coastal-Prozedur schon für eine starke Pitting-Bildung führte, wird eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse für die Desert-Prozedur erwartet.

Ergebnisse Desert 10Y :



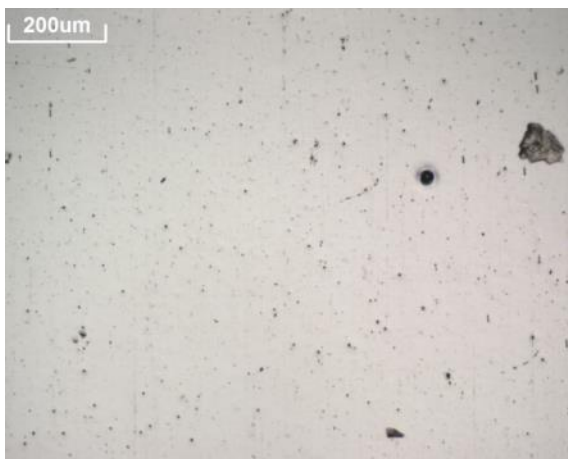
EB33



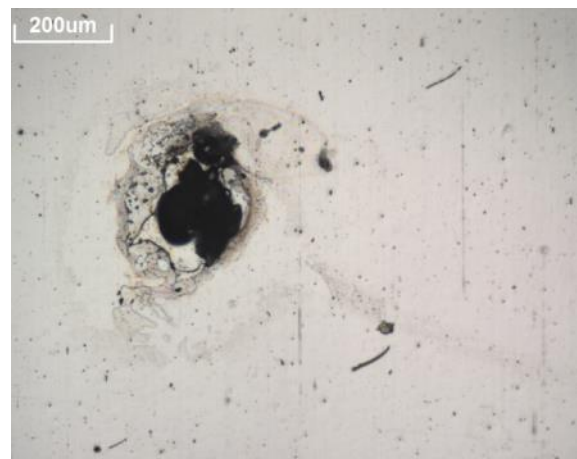
EB37

**Abbildung 1.4.4.4: Probenoberflächen der Proben der zweiten Generation nach „10Y Desert“**

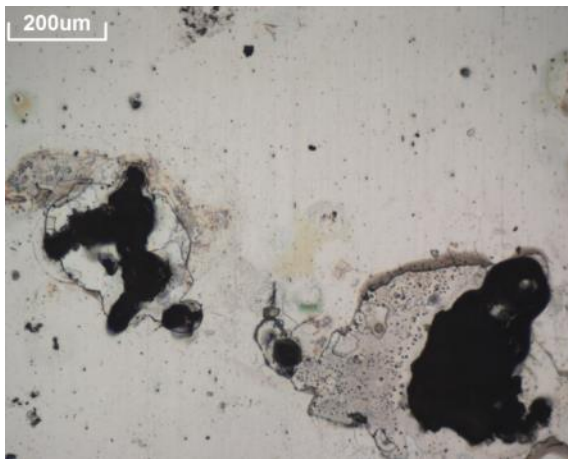
Durch die höhere eingesetzte Sandmenge und die längere Dauer des CASS-Tests werden die Proben auch relativ stark angegriffen. Die Beschädigungen durch die Sandpartikel sind recht deutlich und auch die Pittinglöcher sorgen für eine optische Veränderung. Bei dem Material EB37 kommt es zu einem stärkeren Angriff der Schutzschicht, es bilden sich mehr Pitting-Defekte und die beschädigte Oberfläche um diese Defekte ist wesentlich größer. Bei dem Material EB33 beschränken sich die Beschädigungen stärker auf den direkten Umkreis der Defekte durch die Partikel. Siehe zum Vergleich auch die Mikroskopbilder.



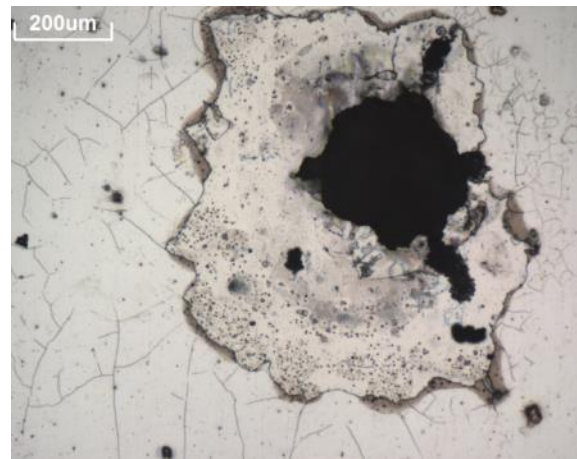
EB33



EB37



EB37



EB37

**Abbildung 1.4.4.5: Mikroskopbilder der Defekte nach nach „10Y Desert“**

Dies zeigt sich auch in den Reflexionsgraden. Der Abfall des Reflexionsgrades ist für Material EB33 deutlich geringer als für Material EB37. Siehe Details in der folgenden Tabelle

Material	Before	After 10Y	Drop (%)
$\rho_{\lambda, \varphi}$			
EB33	90.7	87.8	<b>2.9</b>
EB37	89.9	77.6	<b>12.3</b>
Alumir D	78.9	62.8	<b>16.0</b>
Alumir F	83.6	66.7	<b>16.8</b>

**Tabelle 1.4.4.5: Reflexionsgrade vor und nach sowie deren Verluste nach „10Y Desert“ der zweiten Generation**

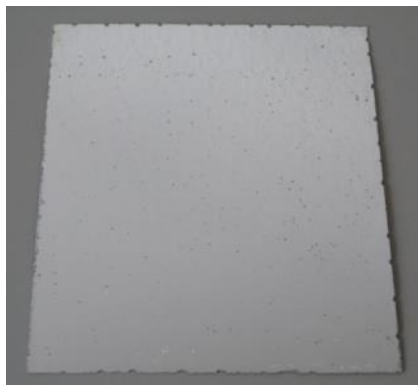
Der Abfall des Reflexionsgrades ist in beiden Fällen deutlich geringer als bei den Vergleichsmaterialien aus dem Alumir-Projekt. Dies ist vor allem wieder darauf zurückzuführen, dass keine Flächenkorrosion der PVD-Schicht auftritt. Gerade das Material EB33 zeigt dabei ein relativ gutes Verhalten. Geht man von einem Standort für den zu entwickelnden Kollektor an einem Wüstenstandort aus und wird der Abfall des Reflexionsgrades von knapp 3 % als akzeptabel angesehen, ist der Lebensdauernachweis damit erbracht.

## 4.4 Ergebnisse 3. Generation

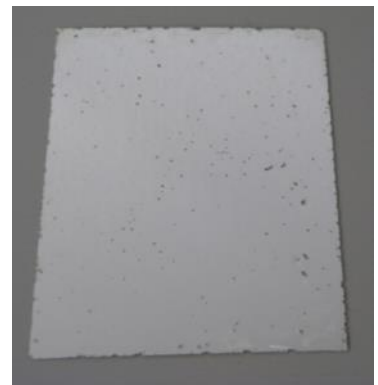
In der dritten Generation wurden 12 weitere Reflektorvarianten mit Silberschicht in der Coastal 3Y Prozedur getestet. Neben den neuen Varianten wurde ein Schichtsystem aus der 2. Generation erneut getestet. Dieses wurde in einer industriellen Beschichtungsanlage hergestellt und soll eventuelle Unterschiede zwischen Produktion in großem Maßstab und Laborbedingungen aufzeigen. In der folgenden Darstellung sind Fotos der Oberfläche aller getesteten Materialien der 3. Generation nach Durchlaufen der Testprozedur abgebildet. Auch bei dieser Generation ist der Unterschied in der Degradation zwischen den Materialien recht ausgeprägt.



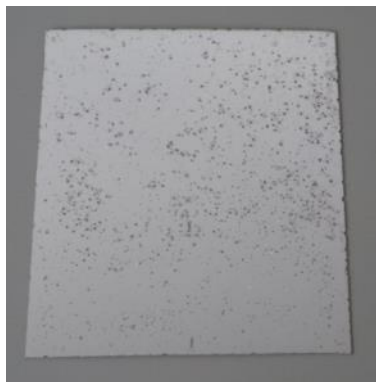
3EB24



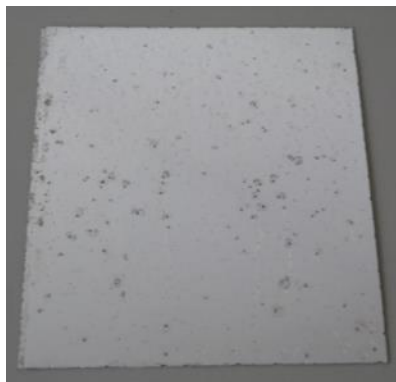
3EB32



3EB36



3EB25



3EB33



3EB37



3EB26



3EB34



3EB38



3EB27



3EB35



3EB39

**Abbildung 1.4.4.6: Probenoberflächen der Proben der dritten Generation nach „3Y Coastal“**

In der folgenden Tabelle sind wieder die Messungen des Reflexionsgrades vor und nach Test sowie der Reflexionsgradverlust dargestellt. Den geringsten Verlust des gerichteten Reflexionsgrades haben dabei in dieser Reihenfolge die Materialien CS3GEB39 , CSGEB35 und CSGEB32. Dies deckt sich auch mit den makroskopischen Beobachtungen. Die Anzahl der Pittinglöcher und der Schichtdefekte ist bei diesen Materialien deutlich geringer. Im Vergleich zur 2. Generation wurde damit bei einigen Materialien noch mal ein Vorteil hinsichtlich der Beständigkeit erzielt.

Material	Layers	Sol-Gel	Before	After 3Y	Drop (%)	Before	After 3Y	Drop (%)
			$\rho_{s,h}$			$\rho_{\lambda,\varphi}$		
CS3GEB24	SiO <sub>2</sub>	A	95.8	94.5	<b>1.3</b>	88.0	79.2	<b>8.8</b>
CS3GEB32	SiO <sub>2</sub>	C	95.7	95.3	<b>0.4</b>	90.5	86.3	<b>4.3</b>
CS3GEB36	SiO <sub>2</sub>	B	95.6	94.8	<b>0.8</b>	90.5	85.4	<b>5.2</b>
CS3GEB25	ZAO	A	96.3	91.4	<b>4.9</b>	90.7	76.2	<b>14.6</b>
CS3GEB33	ZAO	C	95.9	95.9	<b>0.0</b>	92.7	80.5	<b>12.2</b>
CS3GEB37	ZAO	B	96.1	95.3	<b>0.8</b>	92.7	76.9	<b>15.8</b>
CS3GEB26	ZrO <sub>2</sub>	A	96.7	95.9	<b>0.8</b>	93.5	84.1	<b>9.5</b>
CS3GEB34	ZrO <sub>2</sub>	C	96.6	96.7	<b>-0.1</b>	92.2	87.0	<b>5.2</b>
CS3GEB38	ZrO <sub>2</sub>	B	96.6	96.3	<b>0.3</b>	92.1	83.8	<b>8.3</b>
CS3GEB27	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	A	96.5	95.6	<b>0.9</b>	94.0	86.7	<b>7.4</b>
CS3GEB35	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	C	96.4	96.2	<b>0.2</b>	92.4	88.9	<b>3.5</b>
CS3GEB39	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	B	96.4	96.5	<b>-0.1</b>	92.3	89.5	<b>2.8</b>
EB34_2	NiV-Ag	B	95.5	95.0	<b>0.4</b>	91.9	82.5	<b>9.4</b>
EB34_1	NiV-Ag	B	95.5	94.9	<b>0.6</b>	92.2	78.9	<b>13.3</b>

**Tabelle 1.4.4.6: Reflexionsgrade vor und nach sowie deren Verluste nach „3Y Coastal“ der dritten Generation**

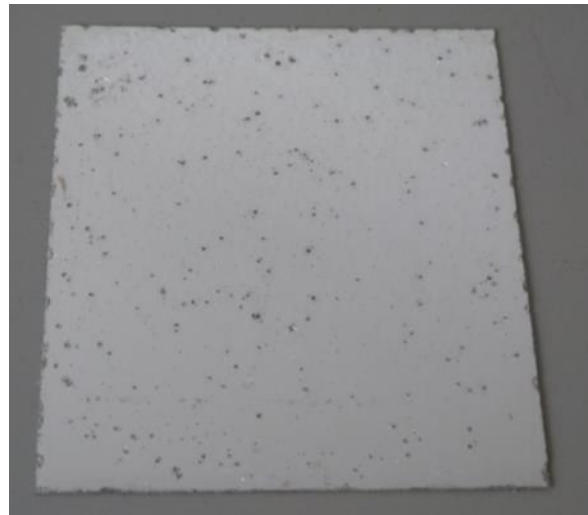
Zum Vergleich zwischen den Laborproben und der industriellen Herstellung:

In der nächsten Abbildung ist die Probenoberfläche der Proben des Materials EB34 aus der industriellen Beschichtungsanlage dargestellt. Das Schadensbild ist dabei sehr ähnlich zu dem bereits in den Tests der 2. Generation festgestellten Bild für dasselbe Material aus dem Labor. Der Reflexionsgradverlust liegt für den neuen Test im Mittel bei 11,4 %, und damit über 4 % niedriger als im Test der 2. Generation, dort lag dieser noch bei 16,0 %.





EB34\_1



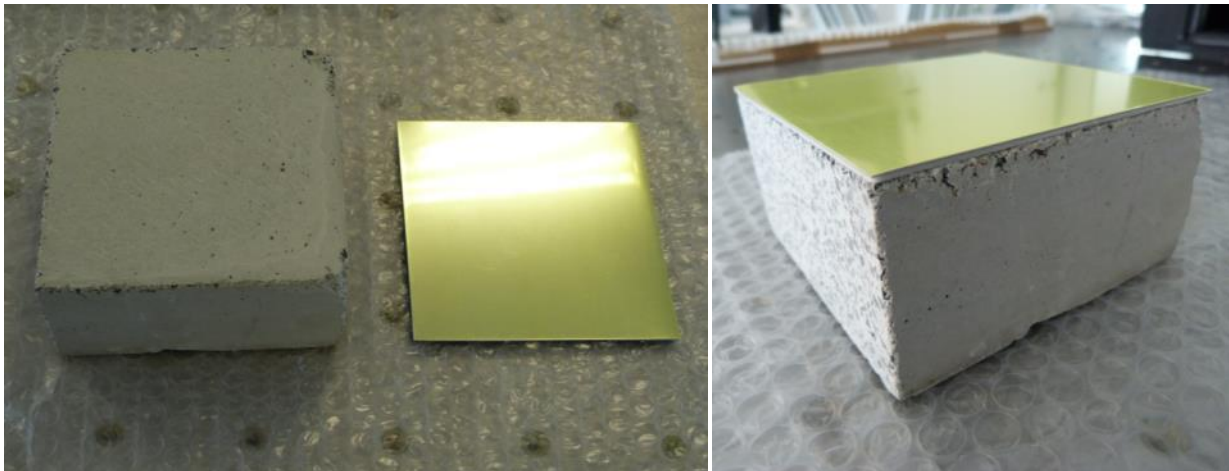
EB34\_2

**Abbildung 1.4.4.7: Probenoberflächen der Proben der dritten Generation nach „3Y Coastal“**

## 5. Identifizierung langzeitstabiler Klebeverbindungen

Wie im Dokument zu AP1.3 beschrieben, wurde für das Aufkleben des Reflektormaterials auf dem Beton ein Doppelseitiges Klebeband der Firma TESA ausgewählt. Das Substrat des Klebebandes ist ein PE-Schaum der auf beiden Seiten mit einem modifizierten Akrylatkleber beschichtet ist. Sowohl auf dem Beton als auch auf den unterschiedlich beschaffenen Aluminiumoberflächen wies das Material eine sehr gute Haftung auf. Um die Verklebung zu testen, wurde das Material auf dem Demonstrator aufgebracht und auch nach längerem Außeneinsatz wurden keine Probleme der Verbindung festgestellt.

Die Beständigkeit des Verbundes von Beton und Reflektormaterial sollte auch in beschleunigten Alterungstests im Rahmen des AP1.4 untersucht werden. Dafür wurden Proben hergestellt die den gleichen Schichtaufbau haben wie der Demonstrator. Dafür werden 10x10 cm<sup>2</sup> Betonproben hergestellt, diese haben eine Dicke von ca. 5 cm. Auf die Proben werden 10x10 cm<sup>2</sup> große Aluminiumspiegelproben mit dem gleichen doppelseitigen Klebeband der Firma TESA aufgeklebt. Die Aufbringung auf dem Beton erfolgt per Hand mit gleichmäßigem Druck auf die Oberfläche. Die Betonoberfläche wird dabei mit Isopropanol und fusselfreien Papiertüchern abgewischt und mit Druckluft zum Trocknen abgepustet. Das eingesetzte Klebeband ist das gleiche das auch für den Demonstrator verwendet wird (Tesa-folie 4957 mit 1,1mm Dicke). In der folgenden Abbildung sind die Bestandteile der Proben vor und die fertige Probe nach dem Aufkleben dargestellt. Die Reflektorschicht ist dabei noch von der Schutzfolie abgedeckt. Diese wird vor der Durchführung der Versuche entfernt.



Vor Aufkleben

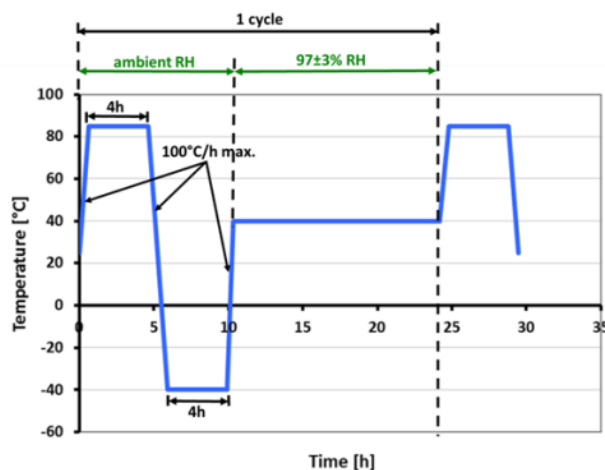
Nach Aufkleben

#### Abbildung 1.4.5.1: Betonkörper und Aluminiumreflektor vor und nach dem Aufkleben

Die Verklebung der beiden Komponenten soll vor allem auf den Einfluss von Temperatur und Feuchte hin untersucht werden. Dafür wurden zwei statische und ein zyklischer Test ausgewählt:

- Damp Heat (IEC 62108 10.7a): Konstante Bedingungen 85°C bei 85% r.H. [3]
- Kondensationstest (ISO 6270-2): Konstante Bedingungen (40°C bei 100% r.H.) [3]
- Thermozyklen (ISO 6270-2CH) [3]

Die Parameter der Zyklen sind in der folgenden Abbildung dargestellt und stellen vor allem starke Ansprüche hinsichtlich starken zeitlichen Temperaturgradienten inklusive starkem Frost (Minimaltemperatur -40°C).



Methode A:

Step	Duration (h)	Temp. (°C)	Relative Humidity (%)
1	4	85	Not controlled
2	4	-40	Not controlled
3	16	40	97±3

#### Abbildung 1.4.5.1: Parameter der Thermozyklen-Tests

Die nächste Abbildung zeigt die Proben im Zustand vor dem Durchführen der Tests ohne die bereits entfernte Klebefolie. Die Proben CSB1 und CSB2 wurden danach dem Thermozyklen-Test ausgesetzt. Probe CSB2 ist dabei die einzige, die nicht mit Isopropanol, sondern nur mit Papiertuch und Druckluft gereinigt wurde. CSB3 wird im Damp Heat Test getestet und CSB4 im Kondensationstest. Der Reflexionsgrad der Proben wird dabei nicht gemessen, da



diese Testreihe nicht die Beständigkeit des Reflektormaterials im Fokus hat, sondern nur die Klebeverbindung.



CSB1 (Thermozyklen)



CSB2 (Thermozyklen)



CSB3 (Damp Heat)



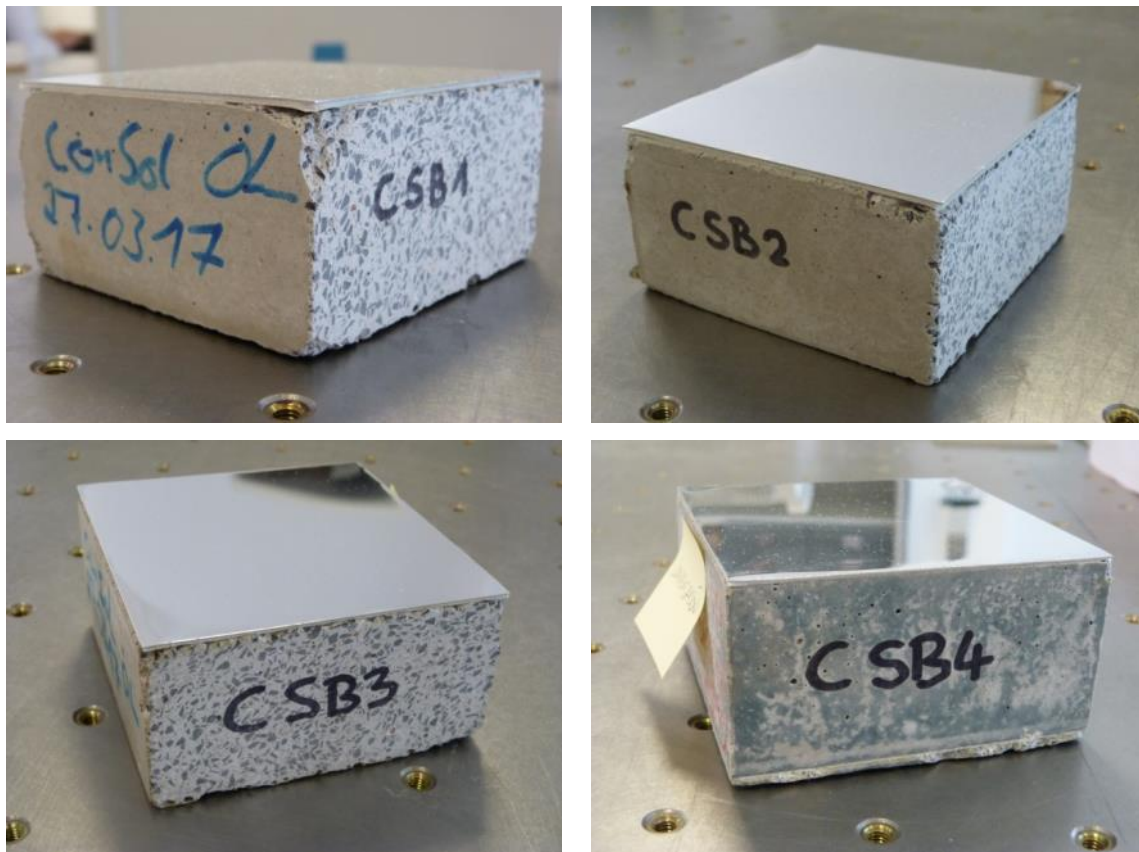
CSB4 (Kondensation)

#### Abbildung 1.4.5.2: Proben im Ausgangszustand

Die Testdauer für den Thermozyklen-Test betrug 480 h und für die anderen beiden jeweils 1000 h.

Testresultate:

Alle drei Tests verliefen positiv. Die Analyse der Proben nach Abschluss der Tests zeigte keinerlei Ablösungen zwischen Reflektormaterial und Betonkörpern. In der folgenden Abbildung sind Aufnahmen der Proben nach Beendigung der Tests zu sehen. Die unvollständige Verklebung an den Ecken einiger Proben war bereits im Ausgangszustand vorhanden und ist Resultat von Ausbrüchen an den Ecken und damit einer nicht planen Betonoberfläche. Einziger sichtbarer Effekt der Tests ist eine leichte Farbveränderung des Betons durch die Aufnahme von Feuchtigkeit. Dieser hatte keinen negativen Einfluss auf die Klebeverbindung.



**Abbildung 1.4.5.3: Proben nach Beendigung der Labortests**

Referenzen:

- [1] Sutter, F.; Wette, J.; Fernández-García, A.; Ziegler, S.; Dasbach, R.: Accelerated aging testing of aluminum reflectors for concentrated solar power, SolarPaces guideline, available online under: <http://www.solarpaces.org/tasks/task-iii-solar-technology-and-advanced-applications>
- [2] IEC 62108:2007: Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies - Design qualification and type approval
- [3] ISO 6270-2:2005: Paints and varnishes - Determination of resistance to humidity - Part 2: Procedure for exposing test specimens in condensation-water atmospheres

## **6. Konzeptentwicklung für eine fertigungsintegrierte Qualitätsüberwachung**

Die grundsätzliche Qualifizierung des ConSol-Kollektor-Konzepts und -Systems in Bezug auf seinen typischen Intercept und daraus resultierenden optischer Wirkungsgrad, seine Trackingqualität, die Verformung unter Eigenlast und Torsionssteifigkeit erfolgt am Demonstrator (siehe Bericht AP4). Gegenstand der Arbeiten zur fertigungsintegrierten Qualitätsüberwachung hingegen ist die Entwicklung eines Konzepts zur Qualitätssicherung der Modulproduk-

tion in einer späteren Feldfabrik. Dies soll dazu dienen möglichst frühzeitig produktionsbedingte Abweichungen gefertigter Module von den typischen optischen Eigenschaften zu identifizieren, im Hinblick auf Ihre Konsequenzen für die Solarfeldperformance zu bewerten und wenn nötig zu beheben.

Bei dem im Projekt entwickelten Kollektorsystem handelt es sich um eine Parabolrinne mit typischen Modulmaßen (Aperturfläche (ca. 6 m x12 m), jedoch sind die für derzeit kommerziell vorherrschenden stahlstrukturbasierten Kollektoren mit Glaspanels etablierten fertigungsintegrierten Qualitätsüberwachungssysteme aufgrund der strukturellen Unterschiede und Fertigungsabläufe nicht im vollen Umfang übertragbar. Die Unterschiede in Bezug auf die Formgebung, Fertigung und Justierbarkeit sind in Tabelle 1.4.6.1 aufgeführt.

**Tabelle 1.4.6.1: Strukturelle und fertigungsbedingte Unterschiede des ConSol-Kollektors im Vergleich zu kommerziell vorherrschenden Systemen**

	<b>Kommerziell vorherrschend</b>	<b>ConSol</b>
	<b>Stahlstruktur mit verschraubtem Glaspanel</b>	<b>Betonhalbschale mit verklebtem Aluminiumreflektor</b>
<b>Formgebung Konzentrator</b>	Durch Glaspanel und 4-6 Haltepunkte an Struktur	Durch Betonhalbschale und vollflächige Verklebung mit Spiegelmaterial
<b>Fertigung Konzentrator</b>	Zusammenbau der Struktur auf Kollektorjig (Form), sofortiges Drehen, Bespiegeln	Guss, 30 Tage Aushärten/Lagern, Montage der Sichern, Drehen, Bespiegeln
<b>Justierbarkeit</b>	Justierung der Struktur bei kritischen Formabweichungen möglich	Halbschale nicht justierbar

Im Gegensatz zu kommerziell vorherrschenden stahlstrukturbasierten Kollektoren lassen sich die ConSol-Module nicht nachjustieren und erst nach einer relativ langen Aushärtungsphase von 30 Tagen bezüglich Ihrer Formgenauigkeit prüfen. Folglich sollte ein besonderes Augenmerk auf der Sicherung der Qualität der Gussformen zu Beginn der Produktion und ihrer Beständigkeit liegen. Zur kontinuierlichen Produktionsüberwachung sollten zumindest tägliche Stichproben gefertigter Module überprüft werden.

## **6.1 Typische Parameter zur Beschreibung der Formtreue von Parabolrinnen(modulen)**

### **6.1.1 Steigungsabweichung**

Die ideale Krümmung für optische Systeme mit dem Zweck, parallel einfallende Strahlung auf einer Linie oder Punkt zu fokussieren ist die Parabel mit einer Brennweite  $f$ .

$$z = \frac{x^2}{4f}$$

Abweichungen von der idealen Oberfläche können in der Höhen- oder Steigungsabweichungen ausgedrückt werden. Ersteres ist nicht ausreichend, um die Qualität der Reflektoren zu beschreiben, da Höhenabweichungen im typischen Bereich nur zu einer Verschiebung des reflektierten Strahls in der gleichen Größenordnung führen, die im allgemeinen keine Auswirkung auf die optischen Eigenschaften hat. Vielmehr müssen Höhenabweichungen von benachbarten Punkten auf der Konzentratoroberfläche im Verhältnis zu ihrem Abstand betrachtet werden. Dies entspricht der lokalen Steigungsabweichung in Krümmungsrichtung:

$$SD_x = \left( \frac{d}{dx} z \right)_{meas} - \left( \frac{d}{dx} z \right)_{ideal}$$

Für linienkonzentrierende Systeme wird die optische Performance vor allem durch Steigungsabweichungen in Richtung der Parabelkrümmung bestimmt. Steigungsabweichungen werden wegen ihrer geringen Absolutwerte nicht in der Einheit [°] sondern in [mrad] angegeben. 1 mrad entspricht einer Höhenabweichung von 1 mm auf einer Strecke von 1000 mm.

### 6.1.2 Formtreue

Die oben eingeführt Steigungsabweichung charakterisiert die Spiegelfläche, aber sie kann nicht direkt verwendet werden, um die optische Performance zu beurteilen. In diesem Zusammenhang ist es hilfreich, die Winkelabweichung in Bezug auf den Abstand von dem Punkt der Reflexion zum Brennpunkt zu betrachten. Dies ergibt die Definition der Fokusabweichung. Fokusabweichungen können direkt mit dem halben Absorberrohrdurchmesser des Parabolrinnenreceivers verglichen werden und ermöglichen eine einfache „hit-or-miss“ Beurteilung des reflektierten Strahls. Die lokale Steigungsabweichungen und die Fokusabweichung  $FD_x$  hängen folgendermaßen zusammen:

$$SD_x = \frac{FD_x}{2f_{local}(x, y)}$$

### 6.1.3 Statistische Werte

Zur Beurteilung der optischen Performance sind die Einzelwerte der räumlich verteilten Steigungs- und Fokusabweichungen im Allgemeinen nicht nötig. Vielmehr wird der RMS Wert ( $RMS_{Sd_x}$  und  $RMS_{Fd_x}$ ) verwendet, da dieser bei hinreichend normalverteilten Abweichungen das Gesamtsystem ausreichend beschreibt.

### 6.1.4 Intercept

Der Intercept eines Kollektormoduls beschreibt, welcher Anteil der einfallenden Strahlung (bei senkrechtem Einfall) auf einen (angenommenen) Receiver reflektiert wird. Er wird mittels Strahlverfolgung und geeigneten Annahmen bzgl. der Aufweitung der einfallenden Solarstrahlung aus den hochaufgelösten Steigungsabweichungen des Konzentrators ermittelt. Folglich handelt es sich beim Intercept um ein integrales optisches Gütekriterium, das den „geometrischen Wirkungsgrad“ beschreibt.

### 6.1.5 Toleranzen

Die tolerierbaren Steigungsabweichungen der Betonhalbschale und des fertig montierten Parabolrinnenmoduls müssen unter Berücksichtigung der Randbedingungen wie Receiverrohrdurchmesser und Fokallänge sowie der anderen Fehlerquellen wie Nachführung und Spiegelmaterial bestimmt werden. Als Richtwert kann ein  $\text{RMS\_Sd}_x < 2.5 \text{ mrad}$  als ausreichend und mit angemessenem Aufwand erreichbar angesehen werden. Dies entspräche für das vorliegende System einem Gesamtintercept von 98% bei senkrechter Einstrahlung. Fertigungsbedingt kann diese Steigungsabweichung zum einen durch die Form der Betonhalbschalen selbst sowie durch das Aluminium-Reflektorblech und seine Verklebung mit den Betonhalbschalen verursacht werden.

## 6.2 Qualifizierungsmethoden zur Formmessung

Die zu bestimmende Zielgröße aller Qualifizierungsmethoden für CSP Konzentratoren ist der optische Wirkungsgrad. Dieser wird vor allem bestimmt durch die Formtreue der Spiegelfläche, wobei hier wiederum Steigungsabweichungen von der Idealform ab der Überschreitung bestimmter Toleranzwerte maßgeblich den optischen Wirkungsgrad reduzieren können.

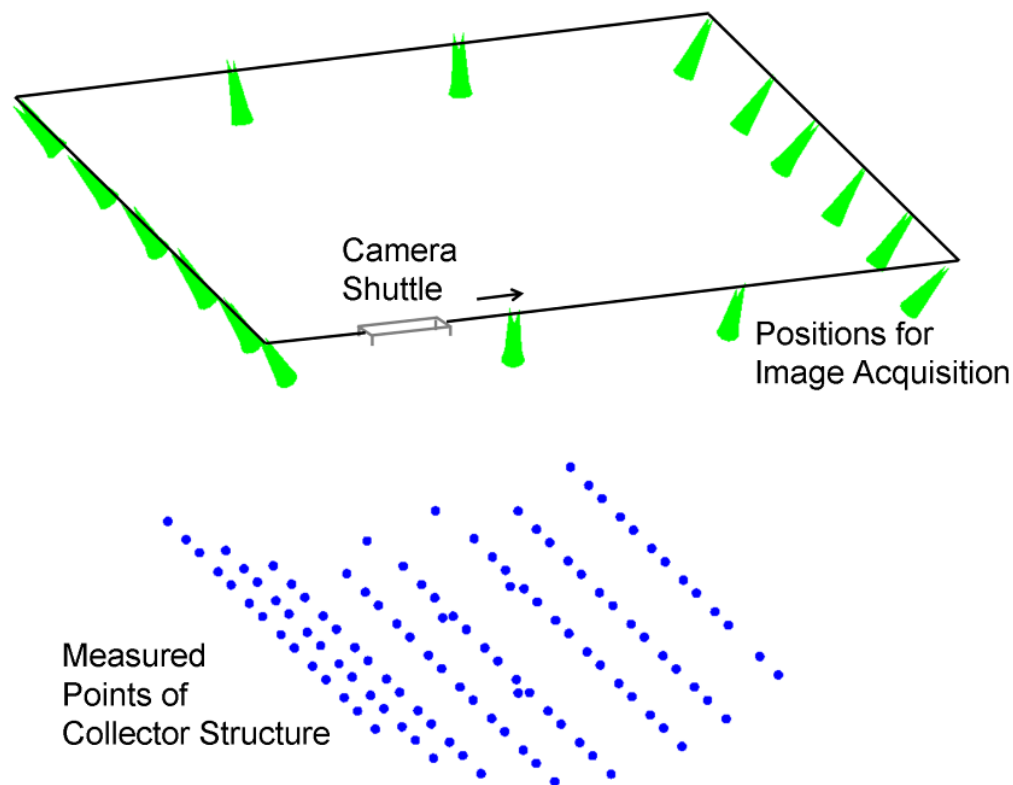
Fast ausschließlich berührungslose optische Methoden sind geeignet, um die großen Flächen solarthermische Konzentratoren mit ausreichend hoher Auflösung und akzeptablem Aufwand zu vermessen. Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen Verfahren, welche 3D Koordinaten messen (Laser - Tracker, Nahbereichsphotogrammetrie) und deflektometrischen Verfahren welche direkt die Steigung (spiegelnder) Oberflächen messen. Erste lassen sich auch auf beliebige Strukturen anwenden.

Bei konventionellen stahlstrukturbasierten Parabolrinnen bietet sich unabhängig von der Messmethode die Möglichkeit an, direkt nach der Messung die Struktur nachzustellen und sich so iterativ der Idealform anzunähern. Im vorliegenden Fall entfällt diese Option aufgrund der nicht justierbaren Betonhalbschale.

Im Folgenden wird eine Auswahl an für Parabolrinnenmodulqualifizierung geeigneten Messmethoden vorgestellt und bezüglich der Anwendbarkeit in der Fertigung der ConSol-Kollektoren bewertet.

### 6.2.1 Nahbereichsphotogrammetrie

Bei der Nahbereichsphotogrammetrie werden zunächst geometrierelevante Punkte mit Messmarken versehen. Mit einer Digitalkamera wird das zu vermessende Objekt wie in Abbildung 1.4.6.1:4.6.1 schematisch dargestellt dann aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen und die Bildinformation danach mit einer entsprechenden Software in 3D Koordinaten der geometrierelevanten Punkte umgerechnet. Vermessen werden können sowohl Strukturen als auch Oberflächen, das Verfahren ist geeignet für die manuelle Vermessung von Prototypen als auch für den vollautomatisierten Einsatz in der Fertigungsumgebung (<http://www.cspservices.eu/index.php?hp=33>). Jedoch skaliert der (zeitliche) Aufwand mit der Anzahl der geometrierelevanten Punkte, was die Vermessung großer Objekte mit hoher räumlicher Auflösung aufwändig und in der Fertigungsumgebung unwirtschaftlich macht.



**Abbildung 1.4.6.1: Schematischer Aufbau einer automatisierten Nahbereichsphotogrammetrie (QFoto) zur Vermessung von Parabolrinnen Stahlstrukturen.**

Die zu erreichende Messgenauigkeit liegt im Bereich unter  $1/10$  mm. Werden aus benachbarten Punkten durch Differenzierung Steigungen berechnet, so wächst der absolute Fehler mit der Erhöhung der räumlichen Auflösung. Für Punktabstände von 0.1 m ist somit von maximalen lokalen Messunsicherheiten bei der Steigungsbestimmung von ca. 1-0.5 mrad zu rechnen [1]. Für größere Abstände reduziert sich dieser Fehler entsprechend.

Der Raumbedarf für diese Messung entspricht ungefähr der zweifachen Raumdiagonale des Messobjekts. Die Messung ist weitgehend unabhängig von den Lichtverhältnissen.

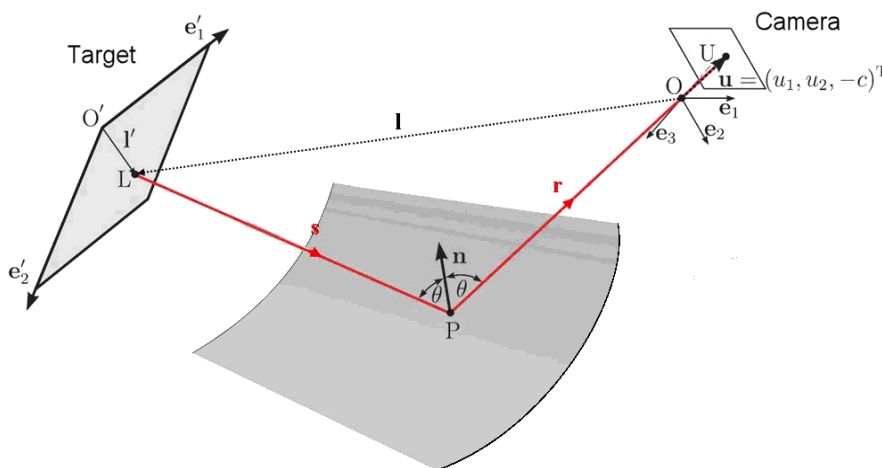
Bei der Betrachtung des Zeitbedarfs muss unterschieden werden zwischen Vorbereitung, Messung und Auswertung. Sobald letztere einmal auf die Messkonfiguration angepasst wurde handelt es sich bei der Auswertung nur um 1-2 Minuten. Die Datenaufnahme dauert bei vollautomatisierten Systemen in der Fertigungsumgebung ca. 15 Minuten. Bei manueller Ausführung werden dazu etwa 1,5 Stunden pro Objekt benötigt. Der größte Aufwand fällt bei der Vorbereitung an. Hier müssen die geometrierelevanten Punkte mit Messmarken versehen werden, was den Aufwand von der Objektgröße, der Zugänglichkeit und der räumlichen Auflösung abhängig macht. Für ein Modul der ConSol-Größe ist hier bei manueller Messung mit ca.  $\frac{1}{2}$  -1 Tag zu rechnen. Bei der vollautomatisierten Vermessung von Strukturen kann dies in weniger als 20 Minuten geschehen.

Im Hinblick auf die Anwendung in der fertigungsintegrierten Qualitätskontrolle einer Feldfabrik im Projekt Consol können folgende Aussage bezüglich der Eignung von Nahbereichsphotogrammetrie getroffen werden:

- Zur Vermessung der Gussformen und ersten unverspiegelten Betonhalbschalen ist die Nahbereichsphotogrammetrie eine sehr geeignete, wenn auch vorbereitungsin-  
tensive Option. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen sollten diese Messungen manuell  
durchgeführt werden.
- Zur stichprobenartigen Vermessung von (Spiegel-) Oberflächen ist eine Anwendung  
nicht zu empfehlen.

### 6.2.2 Deflektometrie

Deflektometrie ist eine Methode um die Steigung einer reflektierenden Oberfläche mit hoher Genauigkeit und räumlicher Auflösung zu messen. Dies geschieht mit einem auf ein Target projizierten Muster, das von der Oberfläche des Spiegels reflektiert wird. Aus der im Spiegel mit einer CCD Kamera beobachteten Reflexion lassen sich Ortskoordinaten von CCD, Reflexion auf dem Spiegel und Ursprungspunkt auf dem Target einander zuordnen. Daraus lässt sich der Normalenvektor des Spiegels an dieser Stelle bestimmen. Im Allgemeinen sind mehrere Aufnahmen von Streifenmuster mit sinusförmiger Helligkeitsverteilung und unterschiedlicher Frequenz und Phase nötig, um die Zuordnung der Ortskoordinaten eindeutig und mit der gewünschten Genauigkeit zu erreichen.



**Abbildung 1.4.6.2: Strahlengang zwischen Target, Spiegel und Kamera bei der Deflektometrie zur Bestimmung lokaler Spiegelsteigungen.**

Diese Messtechnik wurde erfolgreich bei Dishes, Heliostaten, Parabolrinnen und einzelnen Spiegelkomponenten angewendet. Die räumliche Auflösung beträgt bis zu ein Messpunkt (Pixel) pro  $10 \text{ mm}^2$ . Der Messaufbau erfordert mindestens zwei fest installierte Kameras sowie ein Target zur Projektion der Streifenmuster. Der Raumbedarf hängt dabei von der Spiegelgröße und Krümmung sowie der Anzahl der verwendeten Messkameras<sup>1</sup> ab. Während der Messung, welche wenige Minuten dauert, muss der Messraum abgedunkelt werden. Bei einem fest installierten Aufbau beschränkt sich die Vorbereitung auf die exakte Positionierung des Konzentrators.

<sup>1</sup> Bei eingeschränktem Raumangebot kann das Messobjekt mit mehreren Kameras und sich überlappenden Bildausschnitten aufgenommen werden.



Wie bereits erwähnt lassen sich mit Deflektometrie nur spiegelnde Oberflächen vermessen. Sie eignet sich damit für die Endabnahme eines fertig montierten Parabolrinnenmoduls. Für die Vermessung von Gussformen und unverspiegelten Betonhalbschalen hingegen ist sie nicht geeignet (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Messgenauigkeit der Deflektometrie hängt auch wiederum von der Messkonfiguration ab. Generell haben große Abstände zwischen Target, Spiegel und Kamera einen positiven Einfluss auf die Messgenauigkeit. Aktuell ist mit maximalen lokalen Ungenauigkeiten von  $< 0.2 \text{ mrad}$  zu rechnen.

Das in Zusammenarbeit mit dem DLR entwickelte Deflektometriesystem ist bereits in einigen Fertigungslinien implementiert (<http://www.cspservices.eu/index.php?hp=35>). Darüber hinaus gibt es von SANDIA ähnliche Verfahren:

- SOFAST
  - [http://blogs.bu.edu/ktrap/files/2012/12/ES2009-9016\\_Fringe\\_Reflection\\_Method.pdf](http://blogs.bu.edu/ktrap/files/2012/12/ES2009-9016_Fringe_Reflection_Method.pdf)
- Aimfast
  - <http://blogs.bu.edu/ktrap/files/2012/12/SLE031018.pdf>

### 6.2.3 Laser-Scan-Verfahren

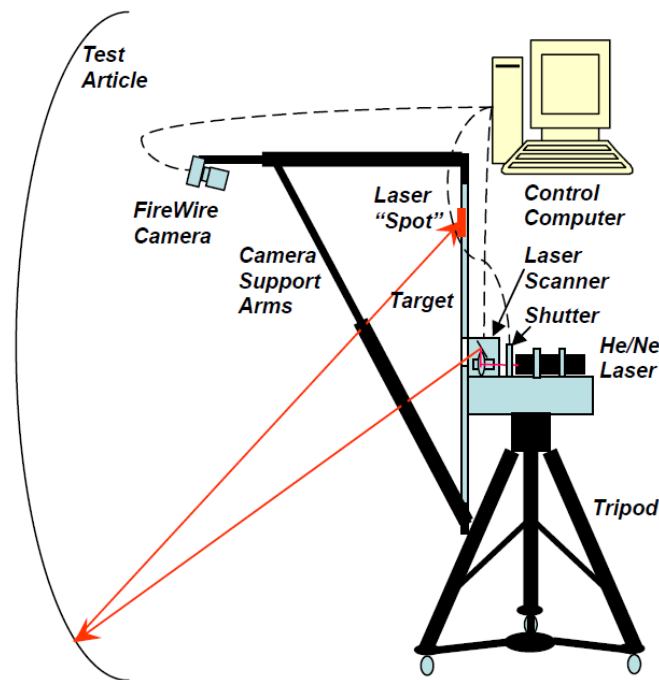
Laser-Scan-Verfahren können in zwei Konzepte unterteilt werden. Bei ersterem (Abschnitt 6.2.3.1) wird die Richtung des vom Spiegel reflektierten Strahls bestimmt, wobei der zugehörige Empfänger sich nicht am Ort der Laserquelle befindet. Diese Verfahren weisen einen relativ komplexen Aufbau auf, sind aber grundsätzlich für die Vermessung spekulär reflektierender Oberflächen geeignet. Beim zweiten Konzept (Abschnitt 6.2.3.2) sind Laserquelle und Empfänger auf einem Schwenkneigekopf montiert, sodass Kugelkoordinaten der Messpunkte über die Winkelstellung zweier Achsen und eine Entfernungsmessung bestimmt werden. Für spiegelnde Oberflächen und hohe räumliche Auflösungen sind diese Systeme nur mit Einschränkungen anwendbar, wohingegen sie bei der Messung von Ortskoordinaten auf beliebigen Objekten mit diffus reflektierenden Oberflächen ein weites Anwendungsgebiet haben.

#### 6.2.3.1 Sender und Empfänger örtlich getrennt

##### **Vshot**

Unter dem Namen Vshot (<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39590.pdf>) wurde von NREL ein Laserscan Verfahren entwickelt, ursprünglich um Steigungsabweichungen von Parabolrinnenkollektoren zu messen. Information über Messgenauigkeit und räumliche Auflösung wurden veröffentlicht (<http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49305.pdf>). Grundsätzlich sind alle scannenden Verfahren in ihrer räumlichen Auflösung unbeschränkt, jedoch sind für grosse Objekte und hohe räumliche Auflösungen sehr lange Messzeiten nötig.





**Abbildung 1.4.6.3: Funktionsprinzip VShot (Quelle: [http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39590.pdf])**

Da dieses System eine geringere Performance im Vergleich zur Deflektometrie im Hinblick auf Geschwindigkeit, räumliche Auflösung und Flexibilität aufweist und keine Vorteile gegenüber Deflektometrie ersichtlich sind, wird es in dieser Studie nicht weiter verfolgt.

### 6.2.3.2 Sender und Empfänger am selben Ort

Allen hier aufgezählten Verfahren ist gemeinsam, dass Kugelkoordinaten über zwei Winkelmessungen und eine Entfernungsmessung bestimmt werden. Unterschiede bestehen hauptsächlich in der Genauigkeit der Entfernungsmessung und wie das Signal vom Objekt reflektiert wird. Dazu sind in der Regel Prismen oder diffus reflektierende Oberflächen nötig. Zur Vermessung von Strukturen sind diese Verfahren im Prinzip gut geeignet und flexibel in der Anwendung. Bei der hochauflösenden Vermessung spiegelnder Oberflächen konnte das am weitesten entwickelte System (Laser Radar) nach jüngsten Erfahrungen [2] nur nach Schwärzung der Spiegeloberfläche und einer Messzeit von > 5 h zur Deflektometrie vergleichbare Ergebnisse liefern.

### ***Tachymeter/Totalstation (Trimble)***

Tachymeter ([http://de.wikipedia.org/wiki/Tachymeter\\_%28Geod%C3%A4sie%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Tachymeter_%28Geod%C3%A4sie%29)) stellen das Grundprinzip aller im Folgenden vorgestellten Lasermessverfahren da. Sie können mit und ohne Prisma einzelne geometriereelevante Punkte messen und Flächen mit moderater Geschwindigkeit scannen. Bestimmte Modelle erlauben ähnlich wie bei Laser Trackern die automatische Nachführung der Bewegung eines entsprechenden Prismas. Die Winkelgenauigkeit beträgt 1 arcsec bei einer Genauigkeit der Entfernungsmessung von 1 mm. Je nach Mo-

dell besteht die Möglichkeit zur Automatisierung sich wiederholender Messaufgaben. Für die Messung von Strukturen ergeben sich daraus folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Bei der Einzelpunktmessung ist ein direkter, interaktiver Eingriff (Korrektur) des geometrierelevanten Punktes möglich
- Einfaches und relativ kostengünstiges System

Nachteile:

- Das Prisma muss an jeden einzelnen geometrierelevanten Punkt gehalten werden – Messzeit und -aufwand proportional zur Anzahl der geometrierelevanten Punkte.
- Fehlstellung des Prismas kann Messfehler verursachen
- Manipulation des Messergebnisses durch manuelles Anlegen des Primas möglich

### ***Laserscanner***

Laserscanner eignen sich zum schnellen Scannen von beliebigen Oberflächen, wenn die Ansprüche an die Messgenauigkeit nicht zu hoch sind (z.B.: <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-vermessung/faro-focus-sup-3d-sup-/anwendungen#main>). Scans können deutlich schneller erfolgen als mit entsprechend ausgerüsteten Tachymetern, wobei dadurch Abstriche vor allem bei der Winkelmessung hingenommen werden müssen. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, aus welcher die geometrierelevanten Punkte nachträglich extrahiert werden müssen. Bei CSP spezifischen Anwendungen konnten sich dieses Verfahren bisher nicht durchsetzen.

### ***Lasertracker***

Lasertracker funktionieren nur in Kombination mit dem entsprechenden Target/Reflektor (z.B.: <http://www.faro.com/de-de/produkte/messtechnik/faro-laser-tracker/ueberblick#main>). Die Messgenauigkeit ist deutlich besser als beim Scanner.

### ***Laser Radar***

Der Laser Radar (z.B.: [http://www.nikonmetrology.com/de\\_EU/Produkte/Grossvolumige-Messaufgaben/Laser-Radar/MV330-MV350-Laser-Radar/%28key\\_features%29](http://www.nikonmetrology.com/de_EU/Produkte/Grossvolumige-Messaufgaben/Laser-Radar/MV330-MV350-Laser-Radar/%28key_features%29)) ist von seiner Funktionalität eine Mischung zwischen Laser Tracker (hohe Messgenauigkeit) und Laser Scanner (schnelles Scanne großer Oberflächen). Laut Hersteller funktionieren diese Systeme auch auf stark spiegelnden Oberflächen, da die Strahlaufweitung des Lasers unterbunden wird und dieser auf die jeweilige Messentfernung fokussiert wird. Ein solches System wurde zu Vergleichszwecken mit Deflektometriemessungen von einem Parabolinnenmodul mit 72 m<sup>2</sup> angewendet [2], wobei bei vergleichbarer Messgenauigkeit eine Messzeit von > 5 h und eine Schwärzung der Spiegeloberfläche nötig war. Systempreise liegen bei ca. 500.000 US\$.

## **6.3 Konzept für Feldfabrik**

Während des Produktionsprozesses der ConSol-Kollektoren in der Feldfabrik sind die folgenden Objekte und Zwischenstufen prinzipiell zugänglich für Messungen:

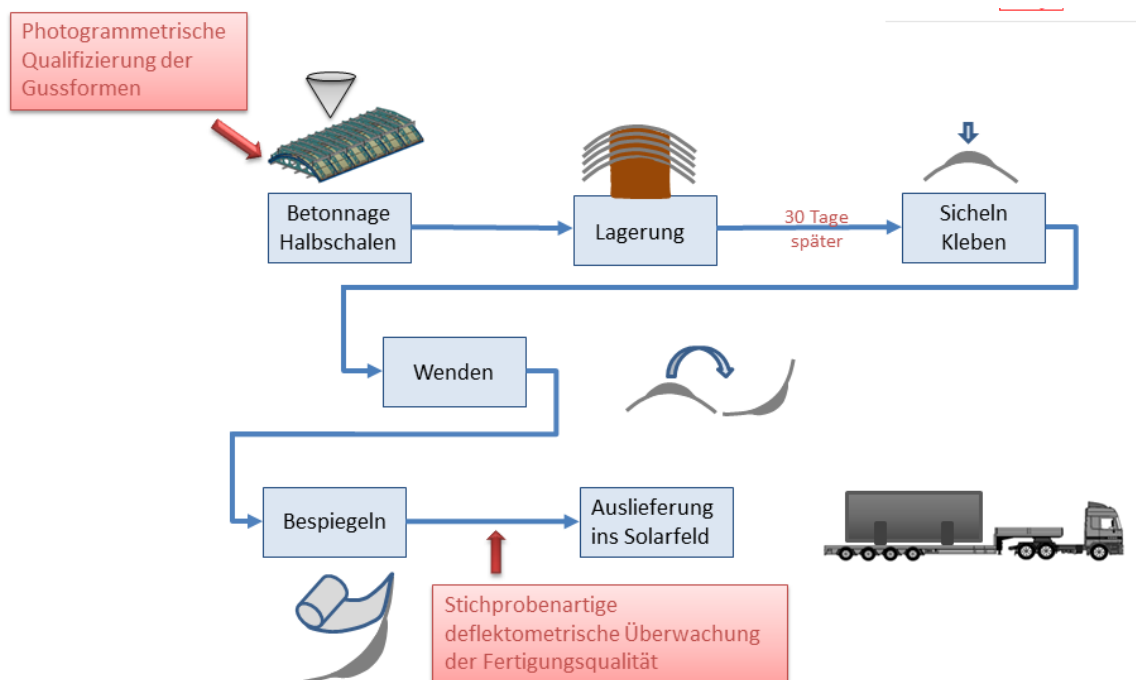
- Gussformen

- Halbschalen (betoniert und ausgehärtet)
- Halbschalen mit verklebten Sichern
- Halbschalen bespiegelt

Aufgrund des systematischen Einflusses auf alle gefertigten Elemente ist eine grundlegende Vermessung der Gussformen gemeinsam mit den ersten produzierten Elementen essentiell. Dies sollte mit hochauflösender Nahbereichsphotogrammetrie erfolgen und zur iterativen Korrektur der Form dienen. Darüber hinaus sollte die Qualitätskontrolle zu Produktionsbeginn möglichst umfassend erfolgen, um eine reproduzierbare Qualität sicherzustellen und mögliche Störeinflüsse aus der Produktionsumgebung auszuschließen und die Serienproduktion zu optimieren. Bei eingespielter Produktion mit reproduzierbarem Betonnage- und Bespiegelungsergebnissen kann eine stichprobenartige Messung mehrerer produzierter Module am Tag ausreichend sein.

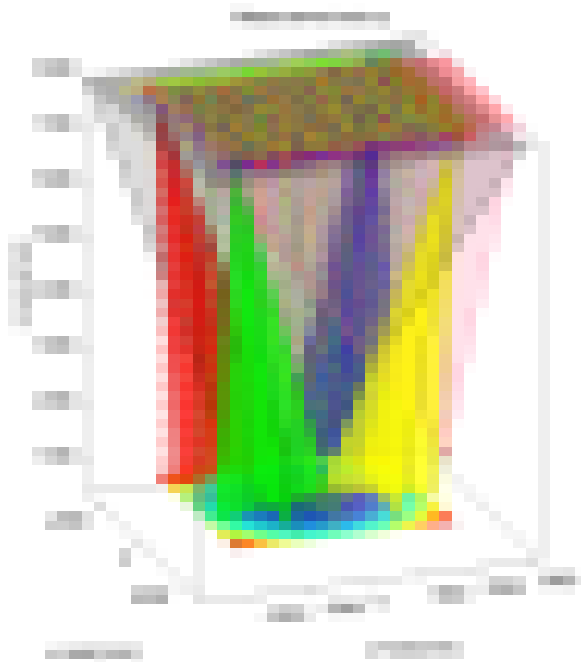
Eine Gegenüberstellung aller vorhandenen Messverfahren ist an dieser Stelle nicht zielführend, weil die Randbedingungen (Produktion, Bauform) im Prinzip nur eine deflektometrische Vermessung zulassen

Da alle Punkte der Halbschale relevant für Konzentratorform sind, da das Reflektor-Material vollflächig aufgebracht wird und das Kleben selbst die Formgenauigkeit auch beeinflussen kann, wird empfohlen zu Qualitätskontrolle in der laufenden Produktion ein Deflektometriesystem einzusetzen. Eine schematische Integration der Qualitätskontrolle in den Produktionsablauf ist in Abbildung 1.4.6.4 dargestellt.



**Abbildung 1.4.6.4: Schematische Darstellung einer fertigungsintegrierten Qualitätsüberwachung für eine Feldfabrik.**

Um die Messung zu ermöglichen, müssen einzelne Kollektormodule am Ende der Produktionslinie abgezweigt und vermessen werden. Dazu wird ein Messaufbau benötigt, welcher sich prinzipiell an der in der folgenden Abbildung dargestellten Konstellation orientiert:



**Abbildung 1.4.6.5: Konzept für die deflektometrische Vermessung eines Konzentrators mit vier Messkameras**

Benötigt wird dazu ein oberhalb des Konzentrators befestigtes Target (Leinwand), auf welche die Streifenmuster der Deflektometrie projiziert werden. Die Abmessungen ergeben sich dabei aus den Modulabmessungen. Grundsätzlich kann der Aufbau relativ kompakt (Doppelte Modullänge und –Breite, Höhe < 15 Meter) gehalten werden, wenn mehrere Kameras genutzt werden. Es ist aber darauf zu achten, dass der Raum abgedunkelt werden muss, um das sensitive optische Messverfahren vor störenden Lichtquellen zu schützen. Die Messzeit setzt sich zusammen, aus der Positionierung des Moduls, der Messung und Auswertung, sowie der Integration des zu vermessenden Moduls in den weiteren Aufbau des Solarfeldes.

Nach bisherigen Erfahrungen sollte der Zeitbedarf nicht über 20 Minuten liegen, was im Rahmen der üblichen Taktzeiten der Produktion liegt.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie mit möglichen Verletzungen der Fertigungstoleranzen umgegangen werden soll, weil die Im Prinzip eine komplexe Fehlersuche im Bereich der Gussform, Lagerung und/oder Verklebung nach sich zieht. Zudem können möglicherweise systematische Form- und Steigungsabweichungen erst 30 Tage nach dem Guss des einzelnen Moduls festgestellt werden und die zwischenzeitlich gefertigten Module schlimmstenfalls ebenfalls unbrauchbar sein, bevor Fehler festgestellt und korrigiert werden können. Dies verdeutlicht nochmal die Notwendigkeit einer sorgfältigen Qualitätskontrolle von Gussformen und Prozessen beim Anfahren der Produktion.

Da neben dem Modulintercept auch die genaue Positionierung der Absorberrohre im Kollektor sowie die absolute und relative Ausrichtung der Kollektormodule im Solarfeld maßgeblich für die optische Qualität der gefertigten und montierten Kollektoren sind, sollte die beschrie-

bene fertigungsintegrierte Qualitätskontrolle durch entsprechende Prozeduren ergänzt werden.

Referenzen:

[1] T. März et al: Validation of two Optical Measurement Methods for the Qualification of the Shape Accuracy of Mirror Panels for Concentrating Solar Systems in Proceedings of the SolarPACES 2010 Symposium, Perpignan (Frankreich).

[2] Ulmer. S. et al: High-Resolution Measurement System for Parabolic Trough Concentrator Modules in Series Production, in Proceedings of the SolarPACES 2012 Symposium, Marrakech (Marokko).

## **7. Charakterisierung der hochreflektierenden Schichtsysteme**

Die Firma Almeco hat während der Entwicklung des hochreflektierenden Schichtsystems begleitende Labortests zur ersten Überprüfung der Beständigkeit des neu entwickelten Reflektormaterials durchgeführt. Es wurden Standarddegradationstests wie Ofen und Feuchte Tests, Salzsprühstests und UV-Tests durchgeführt. Die optischen Eigenschaften des Reflektormaterials mit den verschiedenen neuen Schichtsystemen wurden vor und nach den Tests durch Almeco vermessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1.3.3 und Tabelle 1.3.4, AP1.3, Kapitel 5 zusammengefasst und wurden bereits im AP1.3 Kapitel 5 im Zusammenhang mit den verschiedenen Schichtsystemen diskutiert.

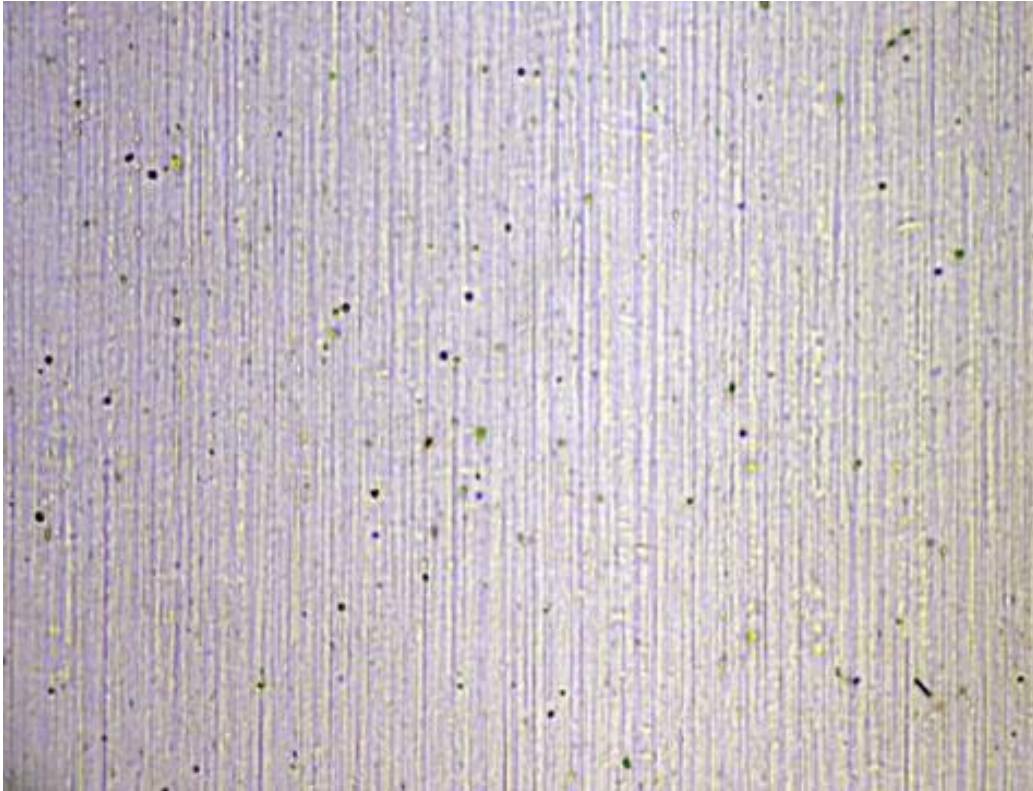
### **REM und EDX Untersuchungen**

Um zu untersuchen, ob durch die neuen Schichtsysteme Silberagglomeration effektiv reduziert werden konnten, wurden REM und EDX Untersuchungen an dem Schichtsystem B, das normalerweise für Beleuchtungsanwendungen verwendet wird und an dem neu entwickelten Schichtsystem C durchgeführt. Im Temperaturtest bei 250°C über 100h wurde festgestellt, dass eine signifikante Abnahme der Totalreflexion auftrat (siehe Tabelle 3), während bei allen neu entwickelten Schichtsystemen keine signifikante Abnahme der Totalreflexion auftrat.

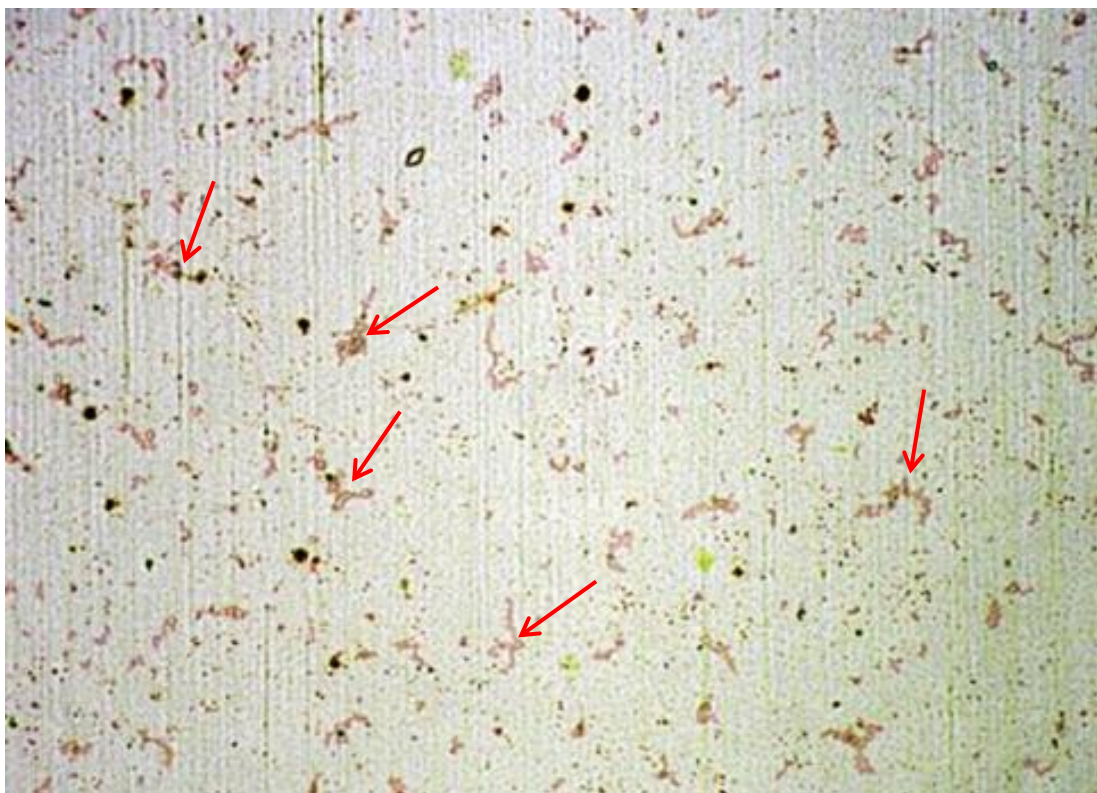
Zunächst wurden die gealterten Proben des Schichtsystems B unter einem optischen Mikroskop untersucht. Die gealterten Proben des Schichtsystems B zeigen eine deutliche Veränderung der Oberfläche im Vergleich zur ungealterten Oberfläche (siehe Bild 7). Es sind fadenförmige dunkle Bereiche erkennbar (siehe Bild 8, rote Pfeile), die offensichtlich die Ursache für die Abnahme der Totalreflektion sind.

Die Oberfläche des Materials C nach dem Ofentest 250°C – 100h weist diese fadenförmigen Strukturen nicht auf (siehe Bild 9). Es kommt lediglich zu einer leichten Verfärbung rund um Pinholes (siehe grüne Pfeile).

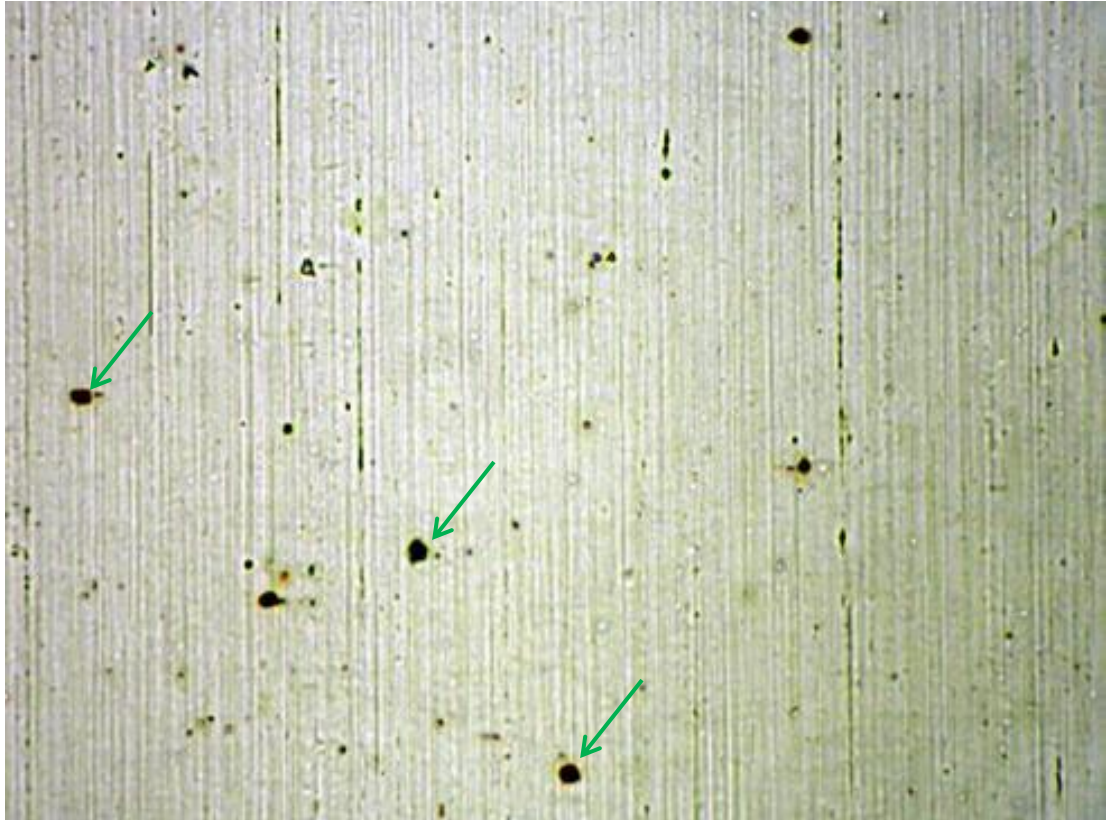




**Bild 7: Oberfläche Schichtsystem B vor Alterung X 100 Vergrößerung**



**Bild 8: Oberfläche Schichtsystem B nach 250°C - 100h Alterung X 100 Vergrößerung**

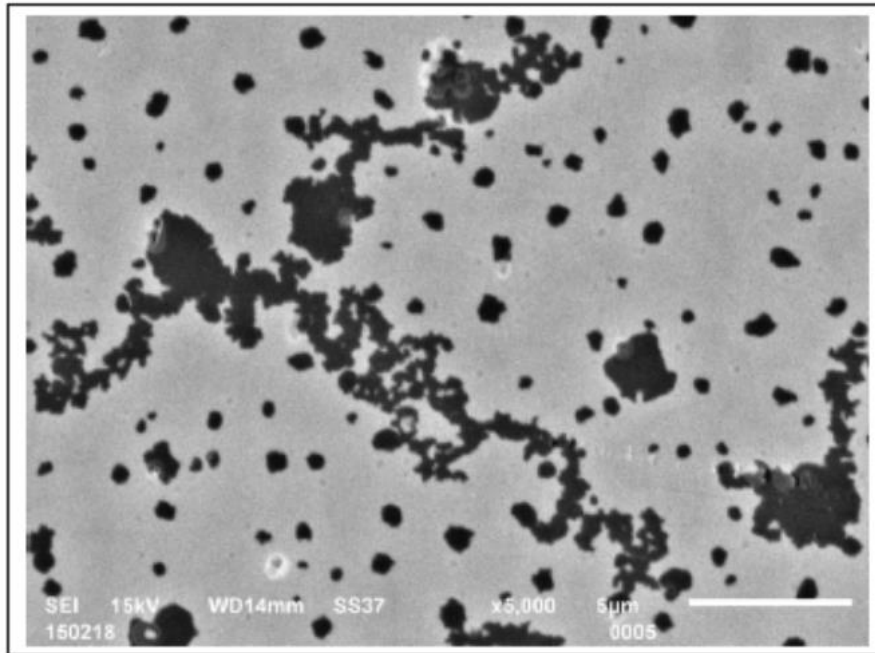


**Bild 9: Oberfläche Schichtsystem C nach 250°C - 100h Alterung X 100 Vergrößerung**

Um die Ursache für die Oberflächenveränderung von Schichtsystem B zu untersuchen wurden REM Untersuchungen durchgeführt.

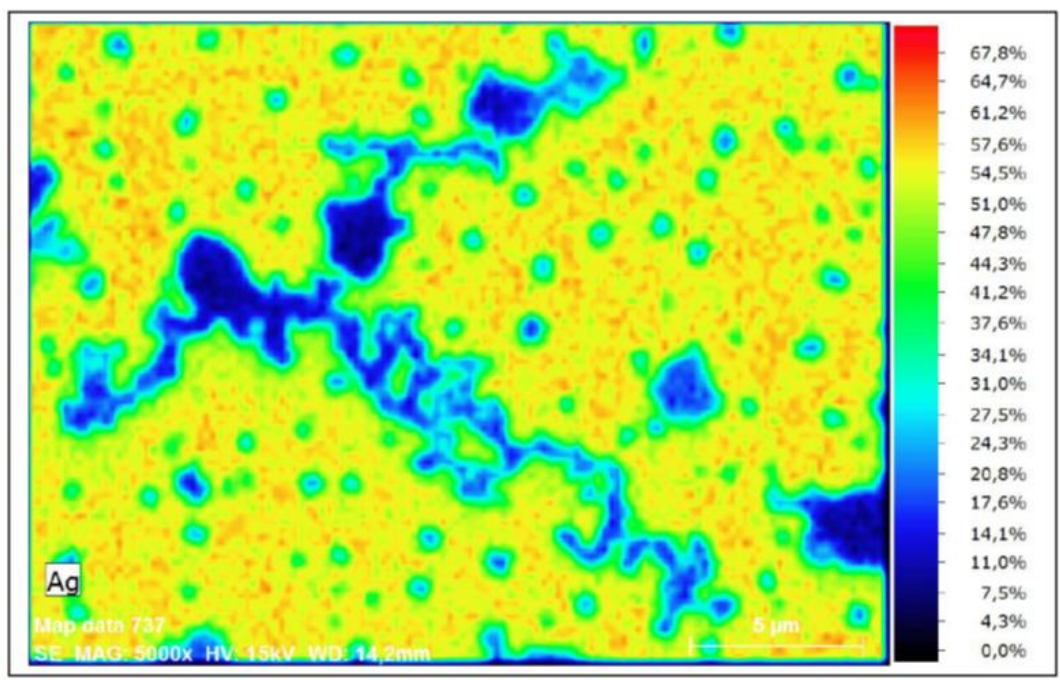
Auch im REM sind die dunklen Fadenförmigen Bereiche, die mit dem optischen Mikroskop beobachtet wurden, erkennbar (siehe Bild 1).





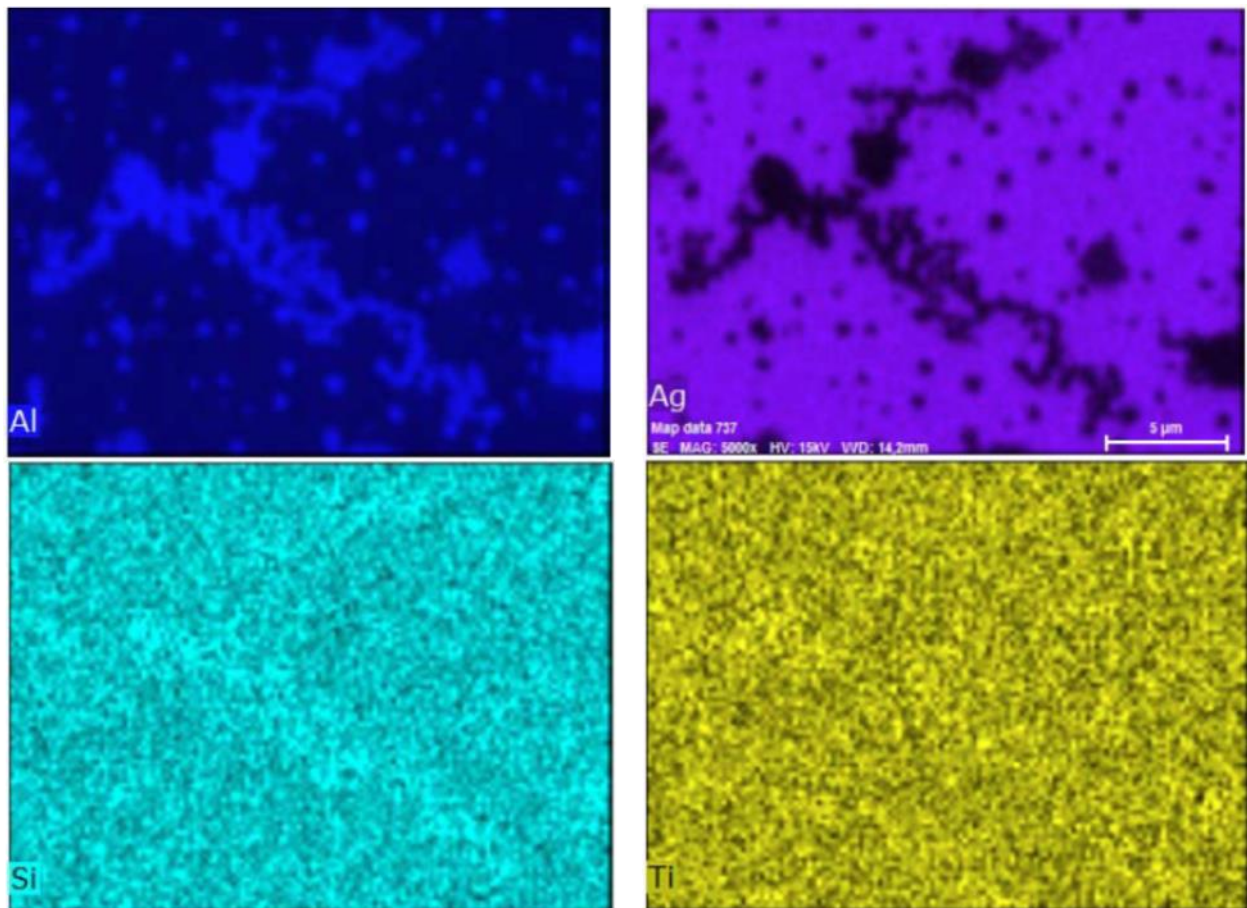
**Bild 1: REM Aufnahme der Oberfläche des Schichtsystems B nach 250°C - 100h Alterung X 5000 Vergrößerung**

Um die Ursache für fadenförmigen Bereiche zu finden, wurde ein sogenanntes EDX-Mapping durchgeführt, in dem die Konzentration einzelner Elemente orts aufgelöst dargestellt wird. In Bild 2 ist die EDX-Map für das Element Silber (Ag) für den selben Bildausschnitt wie in Bild 1 gezeigt. Die dunklen Bereiche des REM-Bildes korrelieren eindeutig mit Bereichen niedriger Silberkonzentration.



**Bild 2: EDX-Mapping für Ag im gleichen Bereich wie im REM Bild.**





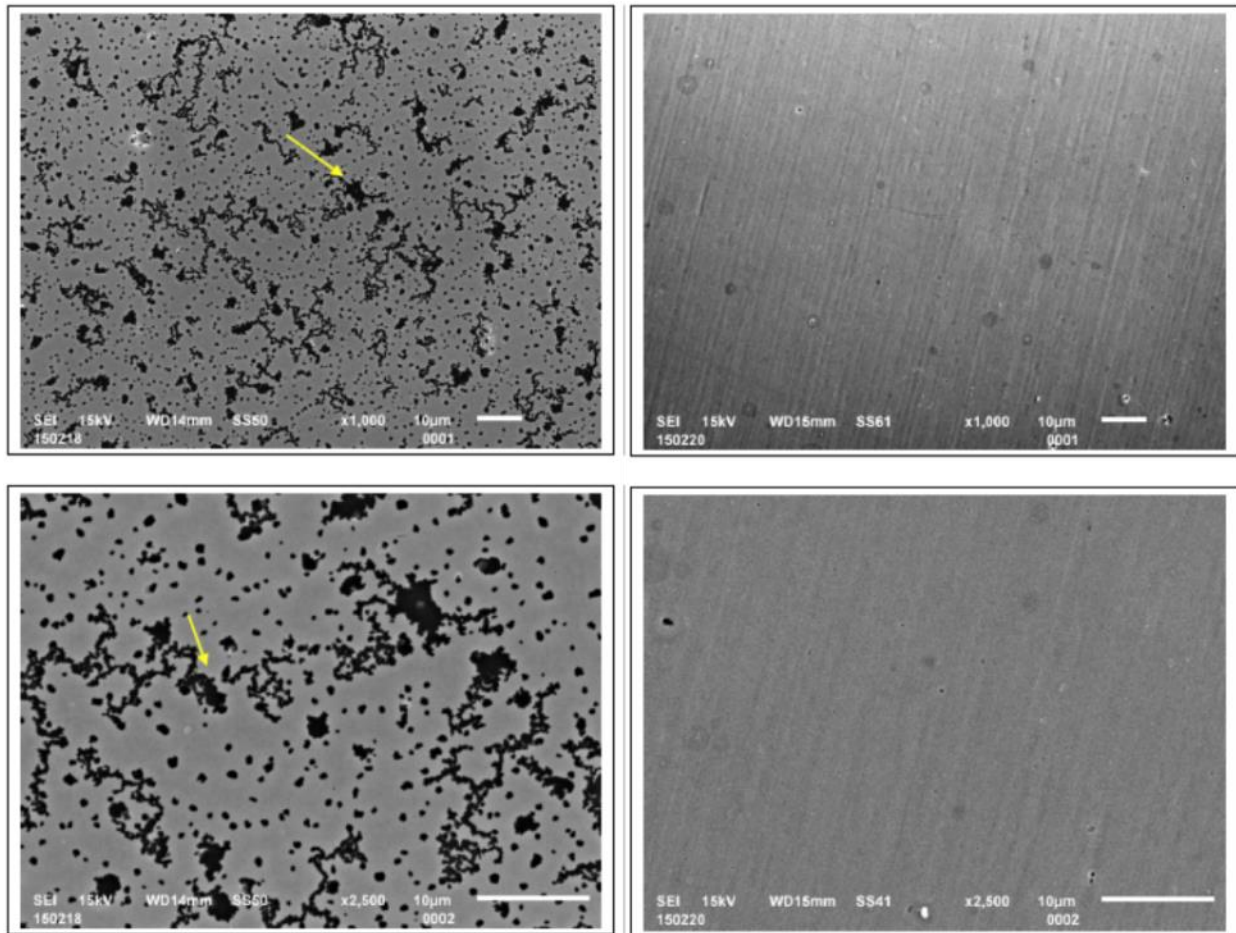
**Bild 3: EDX mapping für die Elemente Al, Ag, Si und Ti**

In Bild 3 sind die EDX-Maps für die Elemente Al, Ag, Si und Ti für den gleichen Bildausschnitt wie in Bild 1 gezeigt. Hier korrelieren Bereiche niedriger Silberkonzentration mit Bereichen hoher Aluminiumkonzentration. In diesen Bereichen ist das EDX Signal für Aluminium aus dem Aluminiumsubstrat höher, da die charakteristische Röntgenstrahlung von Aluminium nicht mehr durch eine darüber liegende Silberschicht geblockt wird. Die Elemente Si und Ti aus dem LI HI Schichtsystem aus SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> sind homogen über die gesamte Untersuchungsfläche verteilt. Daraus kann geschlossen werden, dass diese beiden Schichten durch die Alterung nicht geschädigt wurden. Das Silber ist dagegen agglomeriert.

Zum Vergleich wurde auch eine REM Untersuchung an dem Schichtsystem C nach Ofen Test bei 250°C für 100h durchgeführt. In Bild 4 ist ein Vergleich zwischen der gealterten Oberfläche von Schichtsystem B und dem Schichtsystem C gezeigt. Man erkennt deutlich, dass bei dem neu entwickelten Schichtsystem C keine Silberagglomeration mehr auftritt.

Da die Silberagglomeration schon im optischen Mikroskop sichtbar ist und mit einer Abnahme Reflexion korreliert, wurden die anderen neu entwickelten Schichtsysteme nur noch mittels optischem Mikroskop untersucht. An allen neu entwickelten Schichtsystemen wurden nach Alterung keine Anzeichen mehr für Silberagglomeration festgestellt.

Somit konnte durch die neuen Schichtsysteme eine Silberagglomeration wirksam verhindert werden.



**Bild 4: Vergleich REM Aufnahme in 1000 X Vergrößerung (oben) und 2500 X Vergrößerung (unten) zwischen der bei 250°C für 100h gealterten Oberfläche des Schichtsystems B (links) und des Schichtsystems C (rechts).**

Weitere Untersuchungen der Degradationsmechanismen der neuen Spiegelschichtsysteme wurden durch das DLR durchgeführt.

# ConSol

Concrete Solar Collector

## Bericht AP 2

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilewerk GmbH

# Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	4
2. Einführung.....	4
3. Festlegung der Unterbauten (Größe, Präzision, Fertigungstechnik) .....	4
3.1. Blockfundament Mittelaufleger.....	9
3.2. Blockfundament Randaufleger.....	12
3.3. Köcher Mittelaufleger .....	15
3.4. Köcher Randaufleger .....	19
3.5. Nachweis der Flächenpressung der Abrollhügel .....	23
3.6. Nachweis des Zahnrades .....	26
3.7. Anmerkung .....	29
4. Definition der Kollektorhalterungen (auch Pylone), flexible Verbindungen usw. (Material, Gewicht, Kosten, Verfügbarkeit, Montage) .....	31
5. Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung.....	38
5.1. Herstellung der Fundamente.....	38
5.2. Herstellung Abrollhügel.....	40
5.3. Herstellung der Sichel.....	44
5.4. Herstellung der oberen Verzahnung .....	48
5.5. Herstellung von Sichel und oberer Verzahnung .....	50
5.6. Herstellung Antriebsbock .....	50
6. Auswahl bzw. Vergleich der im Markt verfügbaren Receiver hinsichtlich, Effizienz, Präzision, Kosten und Verfügbarkeit inklusive entsprechender Halterungen .....	52
7. Herstellung der Antriebsregelung, Algorithmen und Sensorik für Sonnenstandsnachführung.....	54
8. Entwicklung eines Wartungskonzeptes aus Sicht des Solarfeldbetreibers.....	58
9. Auslegung des elektrischen Antriebssystems.....	62
10. Konstruktion der mechanischen Schnittstelle zu den elektrischen Antriebe .....	64
11. Entwicklung des Antriebssystems, bestehend aus Leistungselektronik, Motor, Getriebe, Bremse und Kupplung, sowie Stellmitteln (Seil, Stangen, etc.) .....	64
12. Abstimmung der elektrischen Schnittstellen und Sensoren .....	66
13. Konzeptstudie Langlebigkeit Antrieb .....	66
14. Definition Komponentenschnittstellen .....	67
15. Koordination Komponentengeometrie .....	67
16. Erstellung Wartungskonzept .....	68

16.1.	Allgemeines.....	68
16.2.	Typische Wartungs-Kennzahlen.....	68
16.3.	Wartungsaufwand .....	69
16.4.	Wartungsplan.....	70
	Literaturverzeichnis .....	71

# 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	29.04.16	Penkert	Festlegung der Fundamente
2	22.11.2017	Keller	Wartungskonzept bis inkl. Kap. 16.4
3	28.05.2018	Penkert	Abschnitt 3, 4, 5
4	06.06.2018	Penkert	Abschnitt 3, 4, 5
5	11.06.2018	Zippler	Abschnitt 4, 6, 7, 8
6	26.06.2018	Penkert	Abschnitt 3, 4, 5
7	11.07.2018	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung

**Tabelle 0-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 2

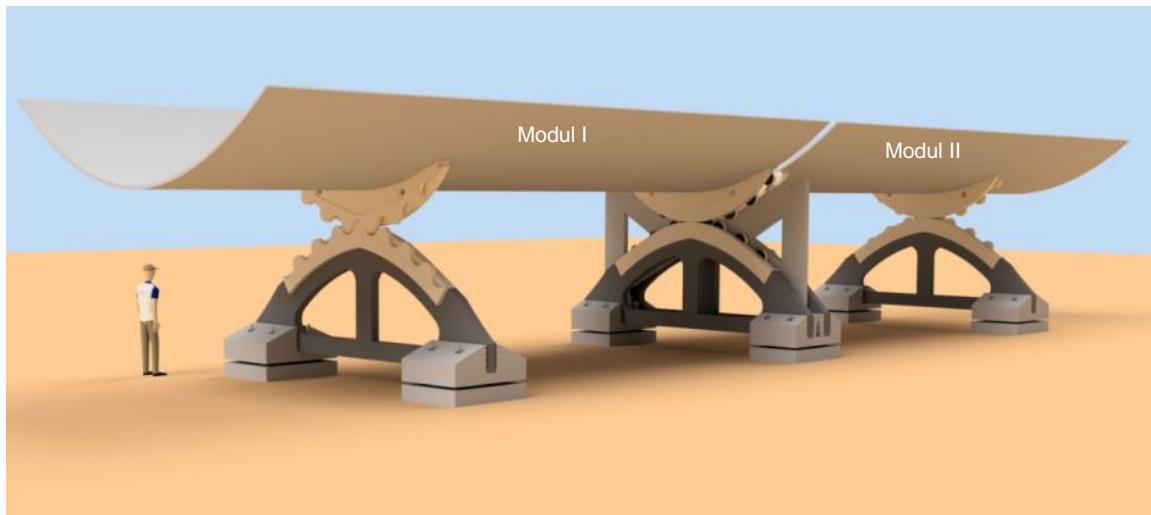
Im Rahmen des AP2 wurden Schnittstellen bestimmt und einige Bauteile gefertigt.

Angepasst an die Nachführung über einen Abrollhügel wurde ein Nachführmechanismus entwickelt. Es wurden als Vorauswahl verschiedene Antriebsarten betrachtet: hydraulisch, Linearantrieb elektrisch, Zahnkranz elektrisch, Schneckenantrieb elektrisch, Zahnkranz, Drahtseil, Rollenkette und Friktionsrad. Es wurden drei Antriebsarten als mögliche Varianten näher untersucht.

Ziel des AP ist die Konstruktion, Planung und teilweise der Test von Kollektorkomponenten und Fundamenten.

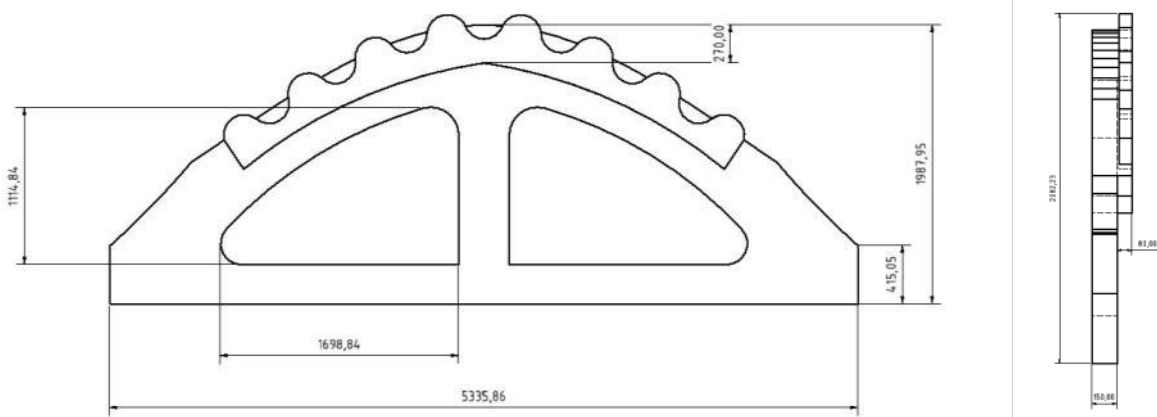
## 3. Festlegung der Unterbauten (Größe, Präzision, Fertigungstechnik)

Die Parabolrinne besteht aus zwei Modulen. Jedes besitzt ein Rand- und ein Mittelaufleger. Das Mittelaufleger ist monolithisch mit zwei Köchern verbunden. Das Randaufleger ist ebenfalls mit zwei Köchern verbunden, die allerdings zusätzlich noch den Antriebsbock tragen. Dieser ist mittig zwischen den beiden Modulen der Parabolrinne platziert. Hiermit werden die beiden Schalen angetrieben und ein Abrollen der Oberbauten entlang der Auflager ermöglicht. Eine Systemübersicht des Demonstrators ist Abbildung 2.3.1 zu entnehmen.



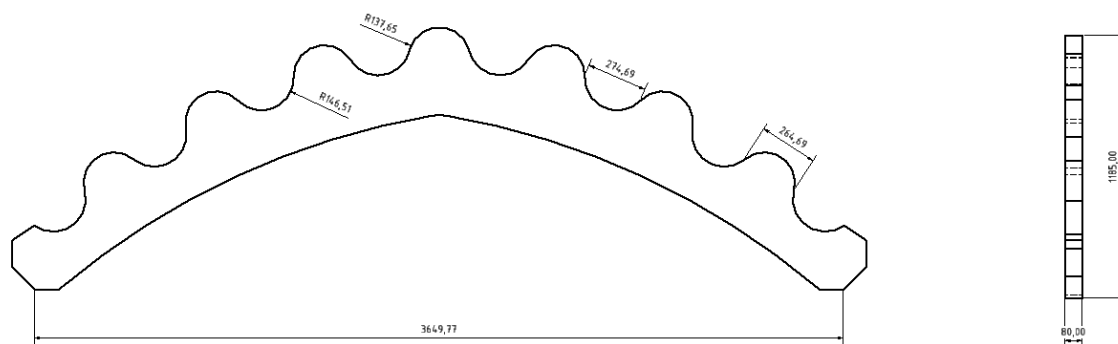
**Abbildung 2.3.1**

Das Mittel- und Randaufleger besitzen eine Länge von 5,34 m bei einer Höhe von 2,06 m und werden aus einem Beton C35/45 hergestellt. Die Lauffläche, auf welcher die Schale abrollt, weist eine Breite von 15,00 cm auf. Seitlich ist an jede Lauffläche eine 8,00 cm breite Verzahnung montiert, welche die Lagesicherheit der Schale gewährleistet. Diese wird aus NANODUR®-Beton gefertigt. Die Abmessungen und Aussparungen der Mittel- und Randlager sind in Abbildung 2.3.2 dargestellt.



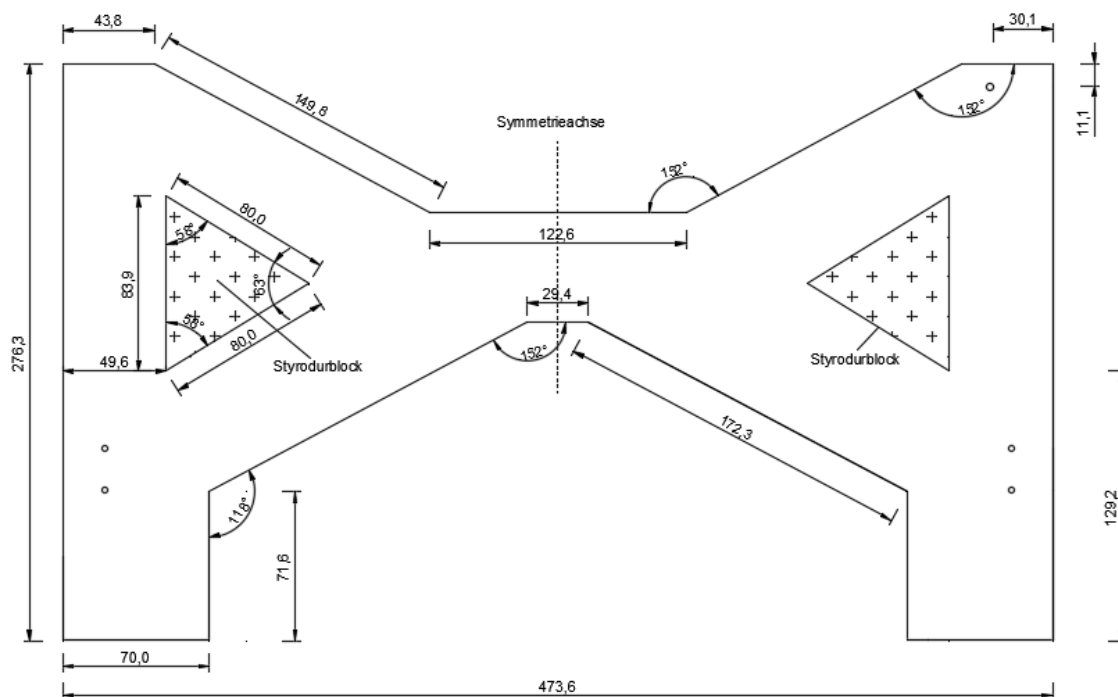
**Abbildung 2.3.2**

In Abbildung 2.3.3 ist die Geometrie der Verzahnung aufgezeigt, die jeweils aus sieben Zähnen mit einem Radius von  $r_1 = 137,65$  mm sowie acht „Zahnradtälern“ mit einem Radius von  $r_2 = 146,51$  mm besteht. Die unterschiedlichen Radien wurden gewählt, um ein Spiel beim Abrollen zwischen Sichel und Abrollhügeln zu ermöglichen.



**Abbildung 2.3.3**

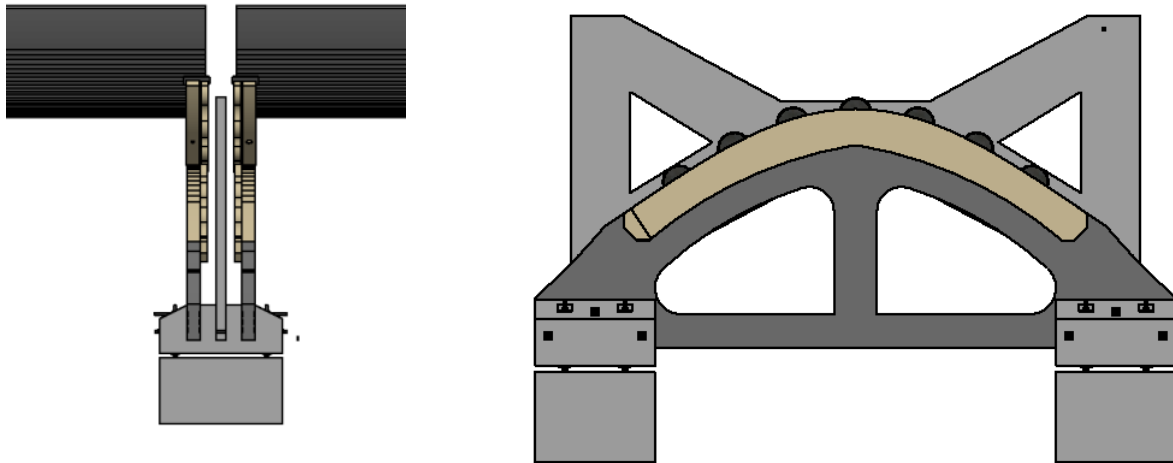
Damit der Antrieb am Randaufleger montiert werden kann ist ein zusätzliches Bauteil notwendig. Der sogenannte Antriebsbock ist in Abbildung 2.3.4 dargestellt. Er soll in der Lage sein, beide Schalen der Parabolrinne anzutreiben.



**Abbildung 2.3.4**

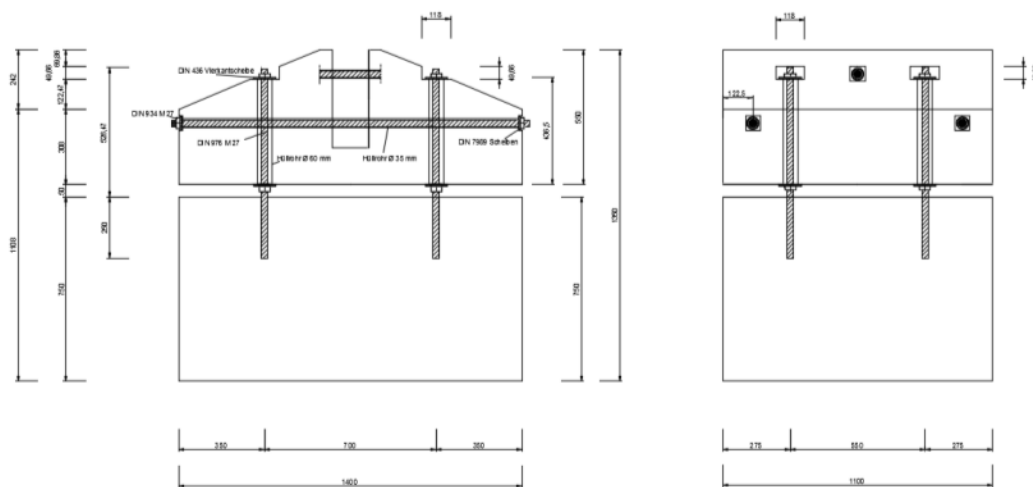
Das Bauteil ist 12,00 cm breit und besitzt eine Länge von circa 4,73 m bei einer Höhe von circa 2,76 m. Die Höhe ist so gewählt, dass eine Kette entlang des Bauteils, (Höhe des Schwerpunktes der Schale) montiert werden kann. Entlang dieser kann der Antrieb über Verbindungsbleche mit der Schale fixiert werden. Aus Abbildung 2.3.5 kann die Position des Antriebsbocks zwischen den beiden Randauflagern entnommen werden. Der Antriebsbock ist ebenfalls aus einem Beton C35/45 gefertigt.





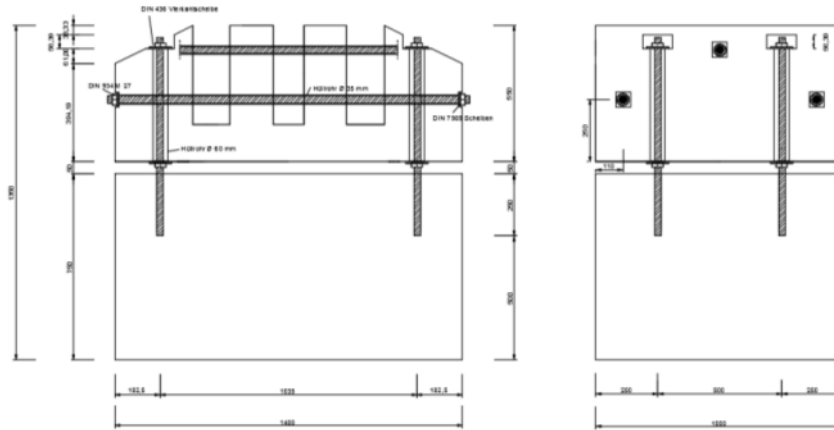
**Abbildung 2.3.5**

Das Mittelaufleger kann nicht direkt auf die entsprechenden Blockfundamente des Erdbodens gestellt werden, da es sonst kippen würde. Außerdem muss die Höhe der Rinne exakt einstellbar sein, weswegen die Abrolllager auf spezielle Köcher gesetzt werden. Hier werden sie mit horizontalen Gewindestangen miteinander verbunden. Anschließend werden diese noch vergossen. Der Köcher für die Mittelaufleger ist in Abbildung 2.3.6 dargestellt. Es besitzt eine Breite von 1,40 m bei einer Länge von 1,10 m und besteht aus einem Beton C35/45.



**Abbildung 2.3.6**

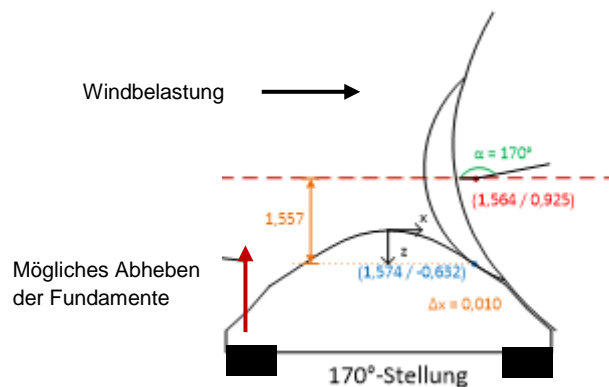
Der Köcher für das Randaufleger kann Abbildung 2.3.7 entnommen werden. Es weist ebenfalls eine Breite von 1,40 m auf, bei einer Länge von 1,00 m und besteht aus einem Beton C35/45.



**Abbildung 2.3.7**

Das Fundament des Randaufagers muss die Kräfte aus den beiden Randabrollhügeln und dem Antriebsbock aufnehmen können. Alle Köcher werden auf Blockfundamente gestellt, die aus einem C20/25 angefertigt werden. Die Blockfundamente besitzen eine Tiefe von 75 cm. In jedes dieser Fundamente wurden jeweils vier M27 Gewindestangen einbetoniert. Auf diese können dann die jeweiligen Köcher gesetzt werden. In den Köchern sind entsprechende Hüllrohre angebracht. Zwischen Blockfundament und Köcher wird ein Abstand von 5,00 cm über Futterplatten und Muttern hergestellt, dadurch ist eine nachträgliche Justierbarkeit des Systems problemlos möglich.

Im Folgenden ist die Bemessung der Fundamente aufgeführt. Zusätzlich ist noch ein mögliches Abheben der Fundamente untersucht worden (siehe Abbildung 2.3.8), da diese eventuell nicht vollständig überdrückt sind bzw. die Eigenlast nicht ausreicht ein Abheben zu verhindern, wenn sich die Schale in einer kritischen Abend- bzw. Morgenstellung ( $\Phi = 10^\circ$  bzw.  $170^\circ$ ) befindet.



**Abbildung 2.3.8**

Die charakteristische Eigenlast der Schale inklusive Sichern beträgt 101,40 kN, siehe Arbeitspaket 1.1.1. Somit wirkt auf das Mittelaufleger eine charakteristische Vertikallast von 101,14 kN 0,75 75,90 kN. Das Randaufleger wird lediglich mit 25 % der Vertikallast belastet, was 25,35 kN entspricht.

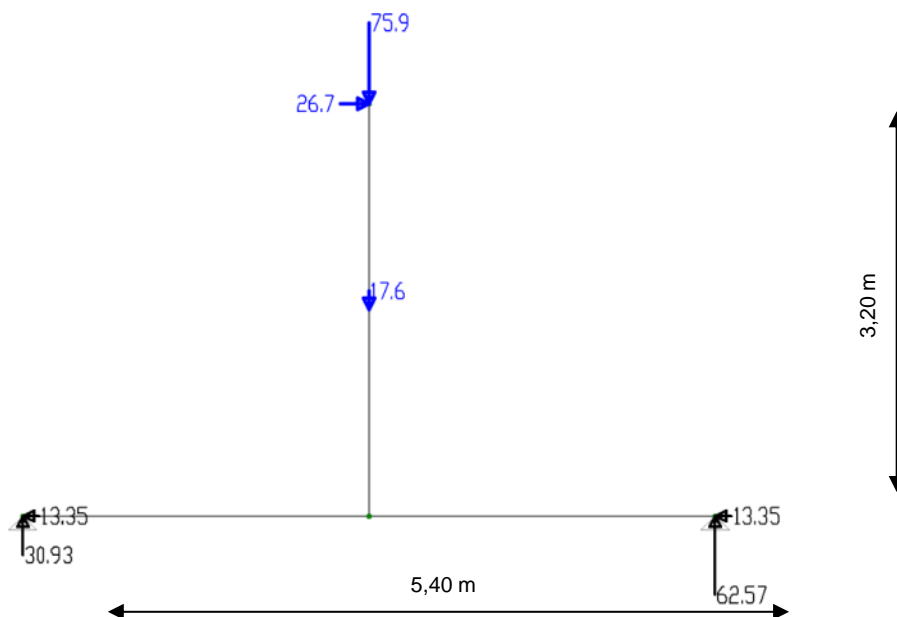
### 3.1. Blockfundament Mittelaufleger

Zuerst wird die Mittagsstellung der Schale im Hinblick auf ein mögliches Abheben der Fundamente betrachtet. Die Einwirkungen sind Tabelle 3 der statischen Berechnung zu entnehmen. Folgende Einwirkungen sind hier berücksichtigt:

- Horizontale Windbelastung von  $23,73 \text{ kN} \cdot 1,5 \cdot 0,75 = 26,70 \text{ kN}$ . Die horizontale Windbelastung für das Randaufleger beträgt somit 8,90 kN (25 %)
- Eigenlast des Abrollhügels von 17,60 kN (ohne Teilsicherheitsbeiwert behaftet)

Die Windlasten sind auf der sicheren Seite liegend mit Teilsicherheitsbeiwerten behaftet worden. Die Eigenlasten sind als charakteristische Werte in die Berechnung mit eingegangen. Schneelasten wurden nicht berücksichtigt, da eine konstante Schneeverteilung die Druckkräfte an den Auflagern erhöhen.

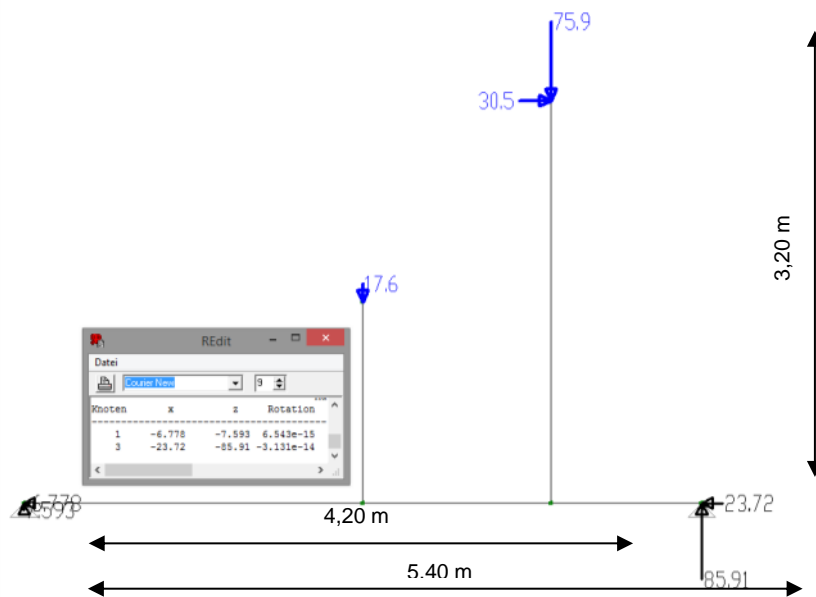
Anschließend wurden die entsprechenden Auflagerreaktionen ermittelt, siehe Abbildung 2.3.9. Die Abmessungen entsprechen der Breite des Abrollhügels von 5,40 m bei einer Höhe von 3,20 m was dem Abstand des Schwerpunktes zum Fundament entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Auflager vollständig überdrückt sind, was ein Abheben der Fundamente in dieser Position ausschließt.



**Abbildung 2.3.9:**

In der Abend- bzw. Morgenstellung ergibt sich die horizontale Windbelastung zu  $27,11 \text{ kN} \cdot 1,5 \cdot 0,75 = 30,50 \text{ kN}$ . Für das Randaufleger ergibt sich diese Windbelastung zu 10,17 kN. Auch hier sind die Windbelastungen teilsicherheitsbehaftet, wohingegen die Eigenlasten auf der sicheren Seite liegend als charakteristische Werte in die Berechnung eingegangen sind. Schneelasten sind in der Morgen- bzw. Mittagsstellung nicht zu berücksichtigen. Die 4,20 m ergeben sich aus der Schalenposition bei einer Auslenkung von  $\Phi = 10^\circ$  bzw.  $170^\circ$ .

Die Auflagerreaktionen sind in Abbildung 2.3.10 dargestellt. Hier sind ebenfalls beide Auflager vollständig überdrückt, was einem Abheben der Fundamente entgegenwirkt.



**Abbildung 2.3.10**

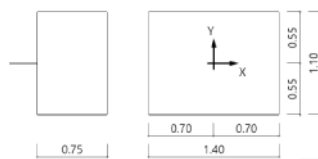
Die Auflagerreaktionen wurden nun für die Bemessung der Blockfundamente für das Mittelaufleger herangezogen. Die maßgebenden Einwirkungen ergeben sich dabei aus Abbildung 2.3.10 für das linke Auflager. Die Berechnungen sind mit Hilfe der Software Frilo durchgeführt worden. Hier ist zusätzlich noch eine 5,00 kN große Windbelastung in Querrichtung des Abrolllagers angesetzt worden, um eine Windbelastungen in Längsrichtung der Schale zu berücksichtigen. Da hierzu keine Windkanaluntersuchungen vorliegen. Deshalb ist die Querrichtung in der statischen Berechnung als vollflächige stehende Wand angenähert worden. Hieraus ergab sich ein Winddruck von  $w_e = 1,15 \text{ kN/m}^2$ . Bei einem Flächeninhalt des Abrollhügels + Lauffläche von  $5,20 \text{ m}^2$  ergibt sich eine Kraft von 5,98 kN. Vereinfachend ist deshalb eine Windbelastung von 5,00 kN pro Blockfundament gewählt worden.

Die Ergebnisse der Bemessung sind wie folgt dargestellt. Es ergibt sich ein Mittelaufleger mit den Abmessungen  $1,40 \times 1,10 \times 0,75 \text{ m}$ . Für den Standort Paderborn bei einer Nutzungsdauer von maximal 5 Jahren soll nicht frostsicher gebaut werden, weswegen eine notwendige Tiefe von 0,80 m nicht eingehalten wird.

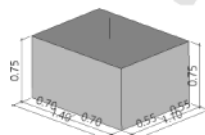
# Position: Mittelfundament - Laststellung 2

Fundament (neu) FD+ 01/2017 (Frilo R-2017-1/P5)

Systemgrafik



Systemgrafik Isometrie



Fundament nach DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 und DIN EN 1997-1/NA:2010-12

## Systemwerte

Bauteil	Beton	Betonstahl	Breite (x) m	Breite (y) m	Höhe (z) m
Fundament	C 20/25	B500B	1.40	1.10	0.75

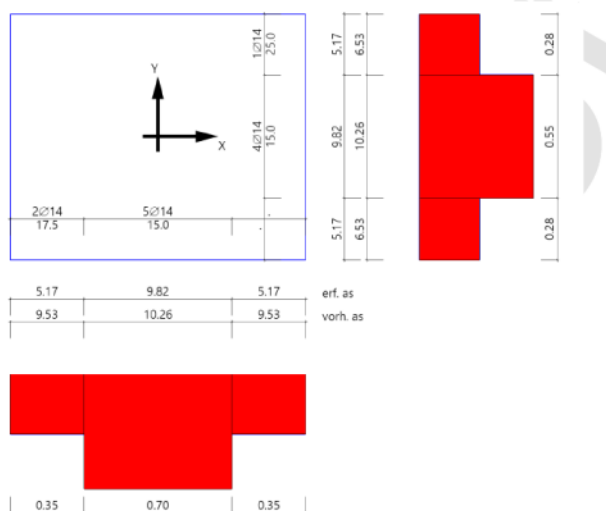
## Ergebnisübersicht Nachweise

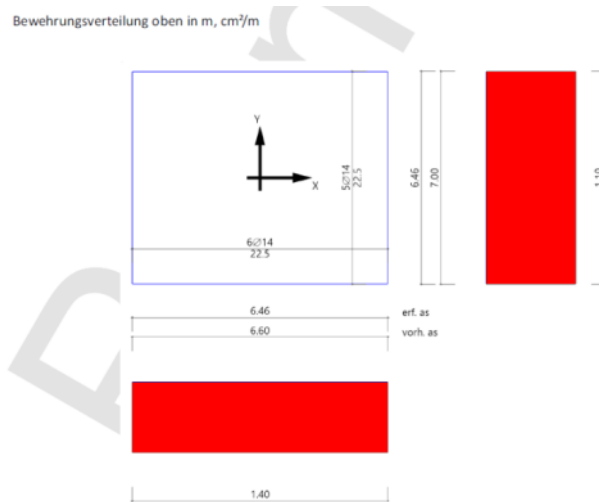
Nachweis	Lastfall I	$\eta_I$	Lastfall II	$\eta_{II}$
Lagesicherheit	1	0.28	1	0.28
klaffende Fuge nur ständige Lasten	1	0.91	1	0.11
klaffende Fuge ständige und veränderliche Lasten	1	0.11	1	0.11
Sohldruck	1	0.12	1	0.12
Neigung der Sohldruckresultierenden	1	0.88	1	0.88
Gleitsicherheit	1	0.65	1	0.65
Grundbruch	1	0.20	1	0.20
Durchstanzen $V_{Ed}/V_{Rd,c}$	1	0.01	1	0.01
Durchstanzen $V_{Ed}/V_{Rd,max}$	1	0.00	1	0.00

## Ergebnisübersicht Bewehrung

Art	Lastfall	cm <sup>2</sup>
Biegung $A_{s,u}$	1	7.1
Biegung $A_{s,v}$	1	9.0
Biegung $A_{s,u}$	1	7.1
Biegung $A_{s,v}$	1	9.0

Bewehrungsverteilung unten in m, cm<sup>2</sup>/m





### 3.2. Blockfundament Randaufleger

Das Randaufleger wird durch zwei Abrolllager und einem Antriebsbock (hier wird der Antrieb montiert) belastet. In Abbildung 2.3.11 und Abbildung 2.3.12 sind die Belastungen aus der Mittagsstellung und der Abend- bzw. Morgenstellung der Schale dargestellt. Die Abmessungen sind entsprechend der Mittellagerbemessung gewählt worden. Angesetzt sind die Windbelastungen und Vertikallasten zu jeweils 25%.

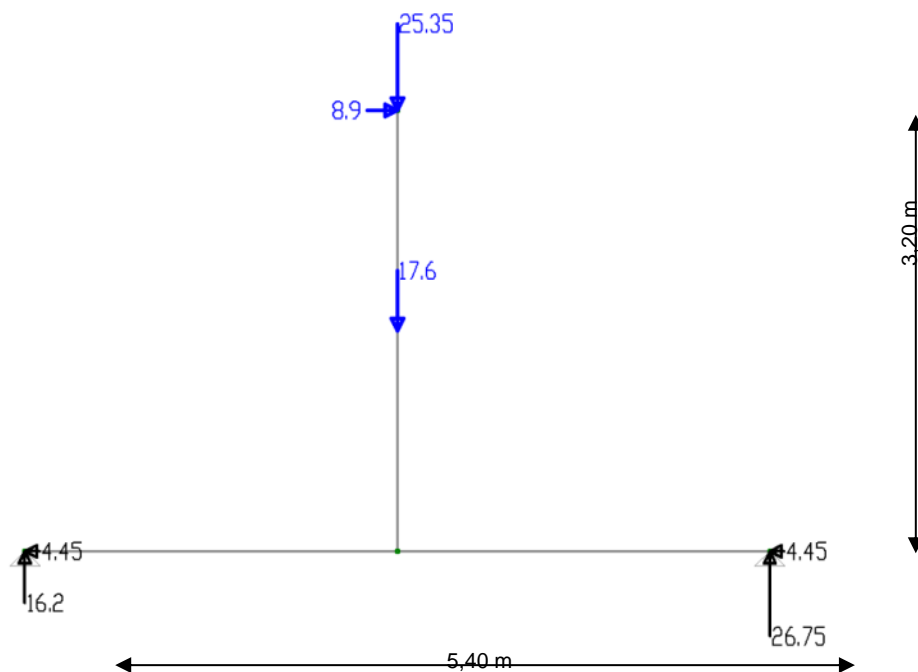
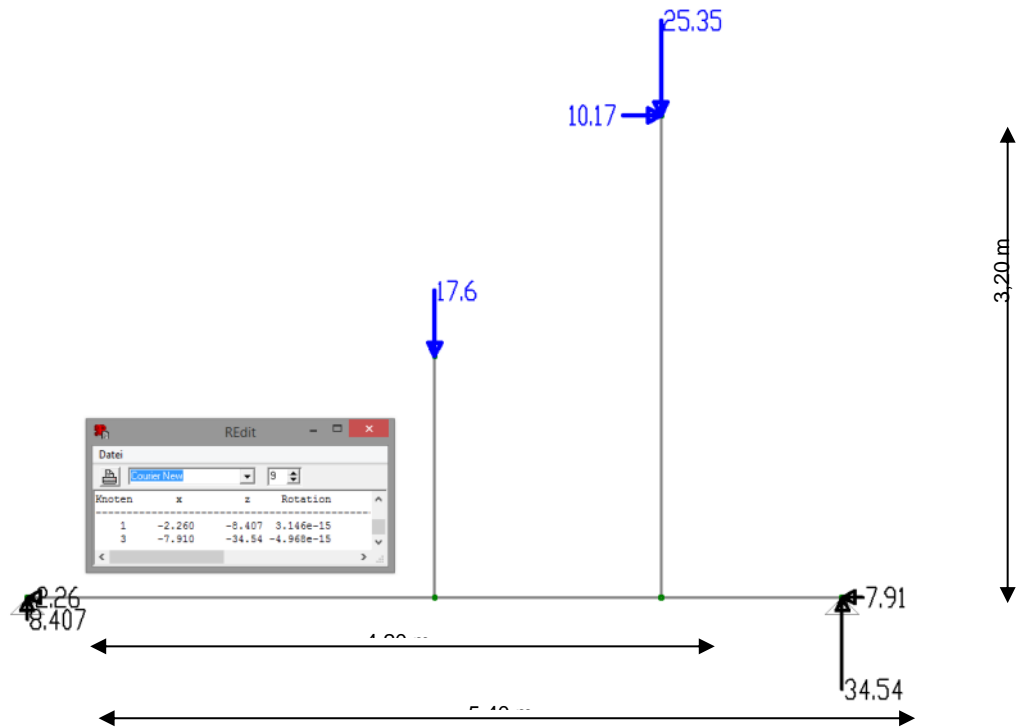


Abbildung 2.3.11



**Abbildung 2.3.12**

Beide Abbildungen zeigen jeweils vollständig überdrückte Auflager, was einem Abheben der Konstruktion entgegenwirkt.

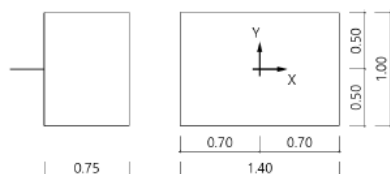
Die Auflagerreaktionen aus Abbildung 2.3.11 und Abbildung 2.3.12 werden zur Bemessung der Blockfundamente des Randaufslagers herangezogen. Hierbei werden zwei Abrolllager sowie der Antriebsbock als Belastung angesetzt. Die Eigenlast des Antriebsbocks ergibt sich zu 16,28 kN und verteilt sich zu jeweils 50 % auf die beiden Randblockfundamente. In Querrichtung zu jedem Randfundament wird noch eine Last von 10,00 kN angesetzt. Diese Kraft deckt eine mögliche horizontale Verschiebung der Schale in Längsrichtung ab und wird nur aktiviert, wenn die Sichel der Schale gegen die Verzahnung der Unterbauten stoßen sollte. Für die Bemessung sind die Lagerreaktionen aus Abbildung 2.3.11 und Abbildung 2.3.12 verdoppelt worden, inklusive der Eigenlast des Antriebsbocks von 8,14 kN pro Blockfundament. Maßgebend wurde der Lastfall aus Abbildung 2.3.11 für das linke Auflager.

Gewählt wurde ein Blockfundament mit den Abmessungen 1,40 x 1,00 x 0,75 m. Auch hier soll nicht frostsicher gebaut werden.

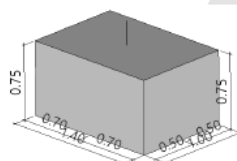
## Position: Randfundament - Laststellung 2

Fundament (neu) FD+ 01/2017 (Frilo R-2017-1/P5)

Systemgrafik



Systemgrafik Isometrie



Fundament nach DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 und DIN EN 1997-1/NA:2010-12

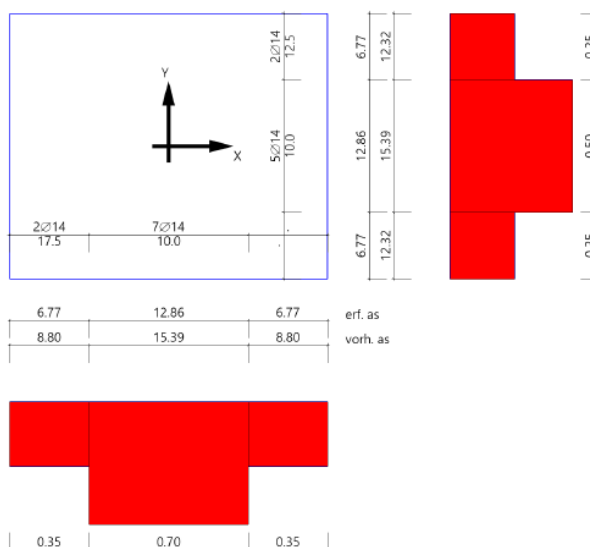
### Ergebnisübersicht Nachweise

Nachweis	Lastfall I	$\eta_I$	Lastfall II	$\eta_{II}$
Lagesicherheit	1	0.22	1	0.22
klaffende Fuge nur ständige Lasten	1	0.86	1	0.10
klaffende Fuge ständige und veränderliche Lasten	1	0.10	1	0.10
Sohldruck	1	0.17	1	0.17
Neigung der Sohl Druckresultierenden	1	0.89	1	0.89
Gleitsicherheit	1	0.66	1	0.66
Grundbruch	1	0.27	1	0.27
Durchstanzen $VE_d/VR_{d,c}$			1	0.01
Durchstanzen $VE_d/VR_{d,max}$			1	0.01

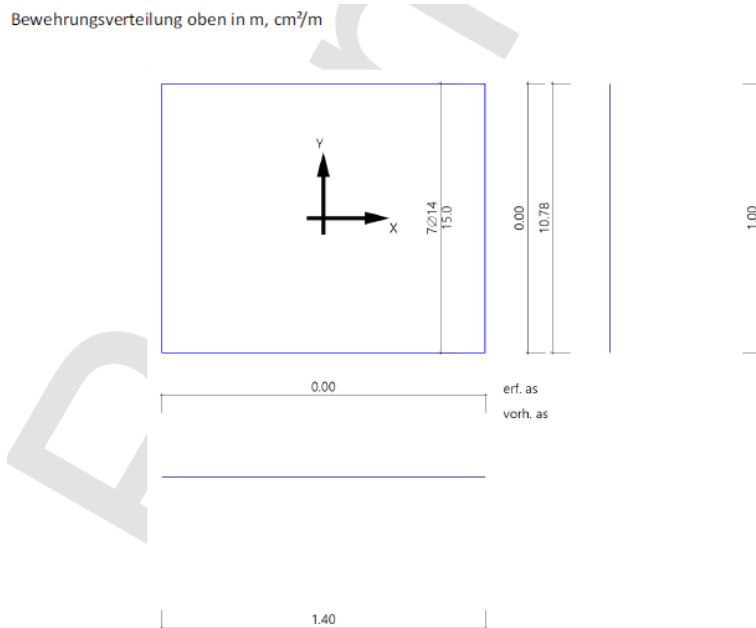
### Ergebnisübersicht Bewehrung

Art	Lastfall	cm <sup>2</sup>
Biegung $As_{xu}$	1	8.5
Biegung $As_{yu}$	1	11.8

Bewehrungsverteilung unten in m, cm<sup>2</sup>/m







### 3.3. Köcher Mittelaufleger

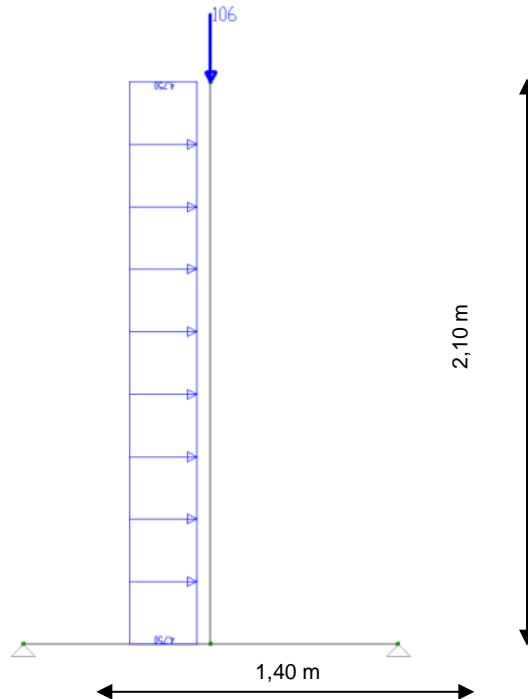
Für die Bemessung des Köchers werden die Abmessungen des Blockfundamentes zugrunde gelegt. Somit besitzt der Köcher des Mittelauflegers eine Breite von 1,40 m, bei einer Länge von 1,10 m.

Die ständige und vorrübergehende Einwirkungskombination liefert eine vertikale Belastung von:

$$V_d = 1,35 \cdot (88,58 \text{ kN} + 10,79 \text{ kN} + 1,77 \text{ kN}) + 1,5 \cdot 46,67 \text{ kN} + 1,5 \cdot 47,32 \text{ kN} \cdot 0,6$$

$$= 249,13 \text{ kN}$$

Diese wirkt zu 75 % auf das Mittelaufleger, wovon die Hälfte auf jeden Köcher anzusetzen ist. Zusätzlich ist noch die Eigenlast des Abrolllagers von  $1,35 \cdot 17,6 \cdot 0,5 = 11,80 \text{ kN}$  berücksichtigt worden. Somit ergibt sich die gesamte Vertikallast zu  $(249,13 \text{ kN} \cdot 0,75 \cdot 0,5) + 11,80 \text{ kN} = 106,00 \text{ kN}$ . Die Streckenlast von  $4,75 \text{ kN/m}^2$  ergibt sich aus der Windbelastung, die in der statischen Berechnung aus freistehender Wand hergeleitet wurde. Die Höhe des statischen Systems ergibt sich aus dem Abstand Köcher und obersten Punkt des Abrolllagers.



**Abbildung 2.3.13**

Hieraus ergeben sich der Momenten- und Querkraftverlauf der Abbildung. Das Maximalmoment ergibt sich zu 42,34 kNm. Die maximale Querkraft ergibt sich zu 60,48 kN. Die Längsrichtung des Köchers ist durch die Abbildung 2.3.9 und Abbildung 2.3.10 angenähert. Hier sind die beiden Auflager lediglich als feste Einspannungen angenommen worden, da der Köcher später mit dem Abrolllager monolithisch verbunden wird und durch Anschlussbewehrung ein Ausreißen des Abrollhügels aus dem Köcher verhindert werden soll. Zusätzlich sind die Einwirkungen mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten behaftet, siehe Abbildung 2.3.14. Das Maximale Moment ergibt sich dann zu 164,00 kNm sowie die maximale Querkraft zu 194,00 kN.

#### Einwirkungen Übersicht:

$$V_{d,i} = 249,13 \text{ kN} \cdot 0,75 = 186,85 \text{ kN (Mittelauflager)}$$

$$V_d = 186,85 \text{ kN} \cdot 0,50 = 93,42 \text{ kN (pro Köcher)}$$

$$\text{Eigenlast Abrolllager} = 1,35 \cdot 17,60 \text{ kN} = 23,76 \text{ kN}$$

$$\text{Eigenlast Abrolllager pro Köcher} = 23,76 \text{ kN} \cdot 0,50 = 11,86 \text{ kN}$$

$$\text{Gesamte Vertikallast} = 93,42 \text{ kN} + 11,86 \text{ kN} = 106,00 \text{ kN}$$

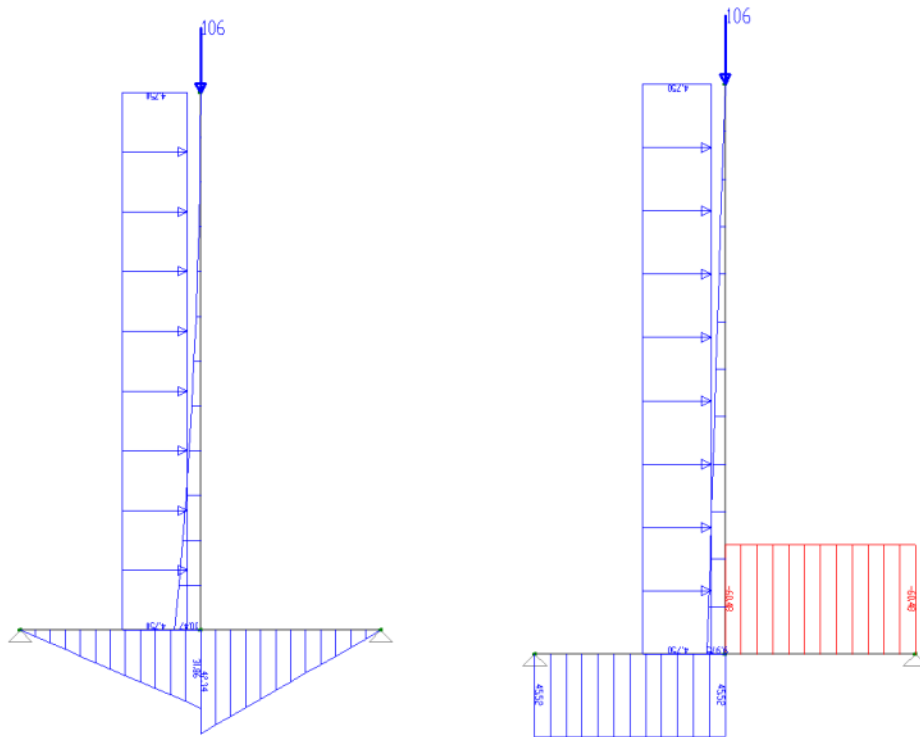


Abbildung 2.3.14

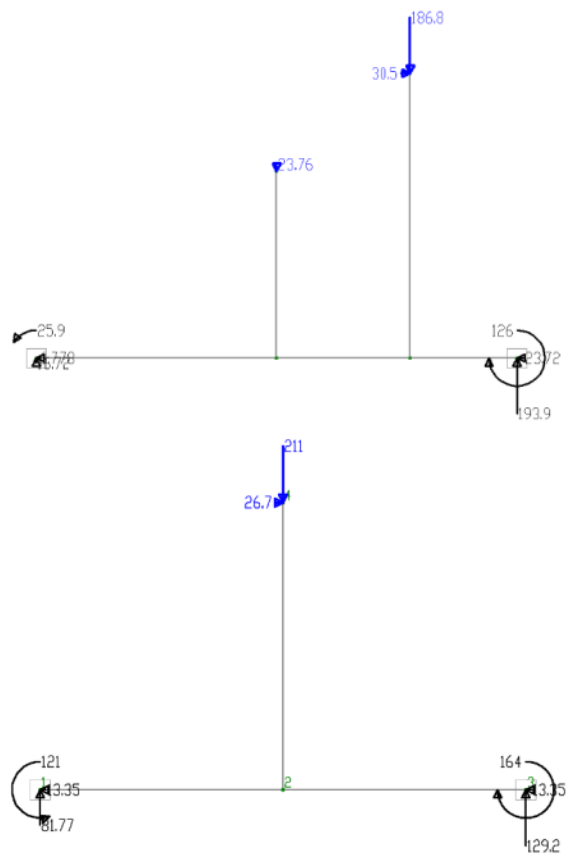
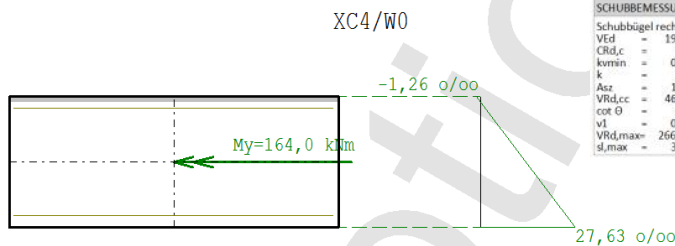


Abbildung 2.3.15

Der Köcher wurde zu einem Balken mit einer Höhe von 55,00 cm vereinfacht. Die Ergebnisse der Biege- und Querkraftbemessung in Querrichtung ist wie folgt angegeben:

BIEGEBEMESSUNG		kd-Verfahren ( $x/d < 0.450$ )			
Nxd =	0.00 kN	Myd =	164.00 kNm		
$\epsilon_1$ =	-1.26 o/oo	$\epsilon_{2s}$ =	25.00 o/oo		
x/d =	0.05	z/d =	0.98	kd =	4.62
erforderlich:		Asu =	10.07 cm2	Aso =	0.00 cm2
		$\mu$ =	0.13 % (MinBg)		

Maßstab 1 : 20

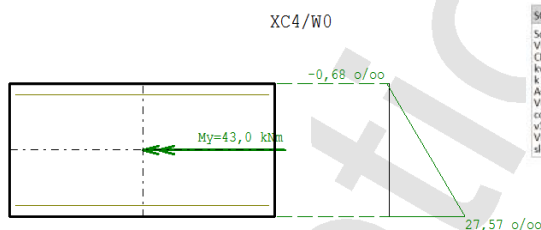


SCHUBBEMESSUNG - QUERKRAFT			
Schubbügel rechtwinklig zur Bauteilachse, Druckspannungen positiv			
$V_{Ed} =$	194.00 kN	$z/d =$	0.854 ( $z < d \cdot 2 \cdot \eta_{\text{nomc}}, \eta_{\text{nomc}} = 4.30$ cm)
$\sigma_{Rd,c} =$	0.10	$k_1 =$	0.12
$\eta_{\text{min}} =$	0.035	$\eta_{\text{min}} =$	0.43
$k =$	1.63	$V_{Rd,c} =$	195.86 kN (6.2a)
$A_{sz} =$	10.07 cm <sup>2</sup>	$V_{Rd,c} =$	302.32 kN (6.2b)
$V_{Rd,cc} =$	469.31 kN	$\sigma_{cd} =$	-0.00 N/mm <sup>2</sup>
$\cot \theta =$	3.00 (18.43 Grd.)	$\sigma_{cd} =$	-0.00 N/mm <sup>2</sup>
$v_1 =$	0.750	$\sigma_{cd} =$	1.00
$V_{Rd,max} =$	2667.68 kN	$a_{sw}V =$	0.00 cm <sup>2</sup> /m
$s_{l,max} =$	30.00 cm	$a_{swMin} =$	14.38 cm <sup>2</sup> /m maßgebend !!

Die Biege- und Querkraftbemessung in Längsrichtung ergibt folgende Ergebnisse.

BIEGEBEMESSUNG		kd-Verfahren ( $x/d < 0.450$ )	
Nxd =	0.00 kN	Myd =	43.00 kNm
$\epsilon_1$ =	-0.68 o/oo	$\epsilon_{2s}$ =	25.00 o/oo
x/d =	0.03	z/d =	0.99
erforderlich:		Asu =	7.91 cm2
		$\mu$ =	0.13 % (MinBg)
			kd = 8.00
			Aso = 0.00 cm2

Maßstab 1 : 20



SCHUBBEMESSUNG - QUERKRAFT			
Schubbügel rechtwinklig zur Bauteilachse, Druckspannungen positiv			
$V_{Ed} =$	61.00 kN	$z/d =$	0.854 ( $z < d \cdot 2 \cdot \eta_{\text{nomc}}, \eta_{\text{nomc}} = 4.30$ cm)
$\sigma_{Rd,c} =$	0.10	$k_1 =$	0.12
$\eta_{\text{min}} =$	0.035	$\eta_{\text{min}} =$	0.43
$k =$	1.63	$V_{Rd,c} =$	166.77 kN (6.2a)
$A_{sz} =$	10.07 cm <sup>2</sup>	$V_{Rd,c} =$	237.53 kN (6.2b)
$V_{Rd,cc} =$	368.74 kN	$\sigma_{cd} =$	-0.00 N/mm <sup>2</sup>
$\cot \theta =$	3.00 (18.43 Grd.)	$\sigma_{cd} =$	-0.00 N/mm <sup>2</sup>
$v_1 =$	0.750	$\sigma_{cd} =$	1.00
$V_{Rd,max} =$	2096.04 kN	$a_{sw}V =$	0.00 cm <sup>2</sup> /m
$s_{l,max} =$	30.00 cm	$a_{swMin} =$	11.30 cm <sup>2</sup> /m maßgebend !!

### Biegebewehrung:

Für die Querrichtung wurden 7 Ø 14 gewählt mit  $A_{s,vorh} = 10,70 \text{ cm}^2 > 10,07 \text{ cm}^2 = A_{s,erf}$

Für die Längsrichtung wurden 6 Ø 14 gewählt mit  $A_{s,vorh} = 10,70 \text{ cm}^2 > 10,07 \text{ cm}^2 = A_{s,erf}$

### Querkraftbewehrung:

Für die Querrichtung wurden Ø 12 – 7,5 gewählt mit  $a_{s,vorh} = 15,08 \text{ cm}^2/\text{m} > 14,38 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{s,erf}$

Für die Längsrichtung wurden Ø 12 – 9,0 gewählt mit  $a_{s,vorh} = 12,57 \text{ cm}^2 > 11,30 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{s,erf}$

Die Bewehrung ist Arbeitspaket 1, Abschnitt 14 zu entnehmen.

### 3.4. Köcher Randaufleger

Für die Bemessung des Köchers werden die Abmessungen des Blockfundamentes zugrunde gelegt. Somit besitzt dieser eine Breite von 1,40 m, bei einer Länge von 1,0 m, Abbildung 2.3.16.

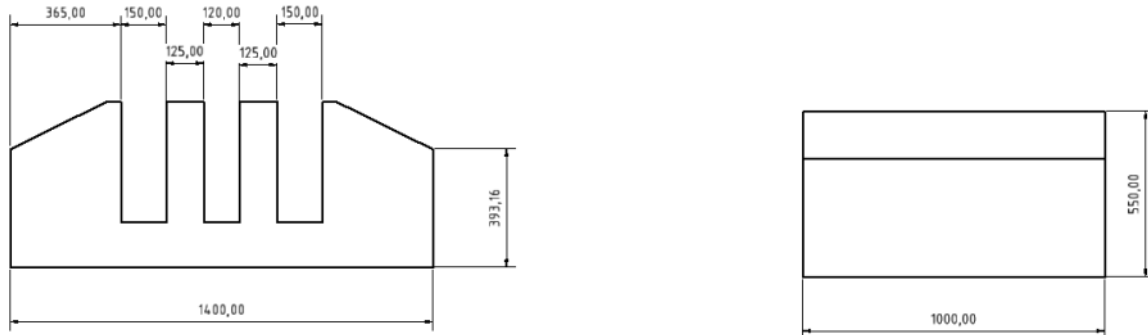


Abbildung 0-1

Für die Bemessung ist der Köcher in Querrichtung zu folgendem statischem System vereinfacht worden. Die ständige und vorübergehende Einwirkungskombination liefert eine vertikale Einwirkung von:

$$V_d = 1,35 \cdot (88,58 \text{ kN} + 10,79 \text{ kN} + 1,77 \text{ kN}) + 1,5 \cdot 46,67 \text{ kN} + 1,5 \cdot 47,32 \text{ kN} \cdot 0,6$$

$$= 249,13 \text{ kN}$$

Diese wirkt zu 25 % auf das Randaufleger, wovon die Hälfte auf jeden Köcher einwirkt. Zusätzlich ist noch die Eigenlast des Abrolllagers von  $1,35 \cdot 17,6 \cdot 0,5 = 11,80 \text{ kN}$  angesetzt worden. Somit ergibt sich die gesamte Vertikallast zu  $(249,13 \text{ kN} \cdot 0,25 \cdot 0,5) + 11,80 \text{ kN} = 42,94 \text{ kN}$ . Zusätzlich ist noch die Eigenlast des Antriebsbocks zu berücksichtigen, welche sich zu  $1,35 \cdot 16,28 = 22,00 \text{ kN}$  ergibt. Zusätzlich ist in horizontaler Richtung noch eine Kraft von 10,00 kN angesetzt worden, welche mögliche Zwangskräfte abdeckt, siehe Abbildung 2.3.17.

#### Einwirkungen Übersicht:

$$V_{d,i} = 249,13 \text{ kN} \cdot 0,25 = 62,16 \text{ kN (Randaufleger)}$$

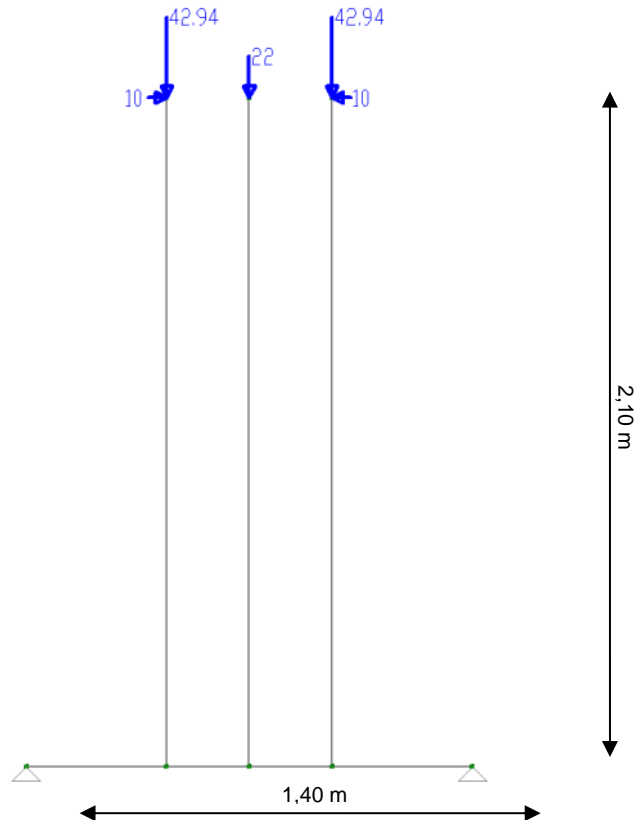
$$V_d = 62,16 \text{ kN} \cdot 0,50 = 31,08 \text{ kN (pro Köcher)}$$

$$\text{Eigenlast Abrolllager} = 1,35 \cdot 17,60 \text{ kN} = 23,76 \text{ kN}$$

$$\text{Eigenlast Abrolllager pro Köcher} = 23,76 \text{ kN} \cdot 0,50 = 11,86 \text{ kN}$$

$$\text{Gesamte Vertikallast pro Abrolllager} = 31,08 \text{ kN} + 11,86 \text{ kN} = 42,94 \text{ kN}$$

$$\text{Vertikallast Antriebsbock} = 1,35 \cdot 16,28 = 22,00 \text{ kN}$$



**Abbildung 2.3.17**

Hieraus ergeben sich der Momenten- und Querkraftverlauf der Abbildung 2.3.18. Das Maximalmoment ergibt sich zu 47,59 kNm. Die maximale Querkraft beläuft sich auf 53,94 kN. Die Längsrichtung des Köchers ist durch die Abbildung 2.3.11 und Abbildung 2.3.12 angenähert. Hier sind die beiden Auflager lediglich als feste Einspannungen angenommen worden, da der Köcher später mit dem Abrolllager monolithisch verbunden wird. Die Vertikallast ergibt sich zu  $249,13 \text{ kN} \cdot 0,25 = 62,28 \text{ kN}$ . Da zwei Abrolllager diese Kraft auf den Köcher aufbringen ist dieser Wert zu verdoppeln. Ebenso die Eigenlast der beiden Abrolllager von  $17,6 \text{ kN} \cdot 1,35 = 23,76 \text{ kN}$  und die Eigenlast des Antriebsbocks von  $1,35 \cdot 16,28 \text{ kN} = 22,00 \text{ kN}$ . Somit ergibt sich die Gesamtvertikallast zu  $(62,28 \text{ kN} + 23,76 \text{ kN}) \cdot 2 + 22,00 \text{ kN} = 194,08 \text{ kN}$ . Auf der sicheren Seite liegend ist noch die horizontale Windeinwirkung von 8,90 kN mit der vollständigen Antriebskraft von 130,00 kN ergänzt worden. Das Maximalmoment ergibt sich somit zu 250,00 kNm mit einer maximalen Vertikallast von 254,60 kN, siehe Abbildung 2.3.19.

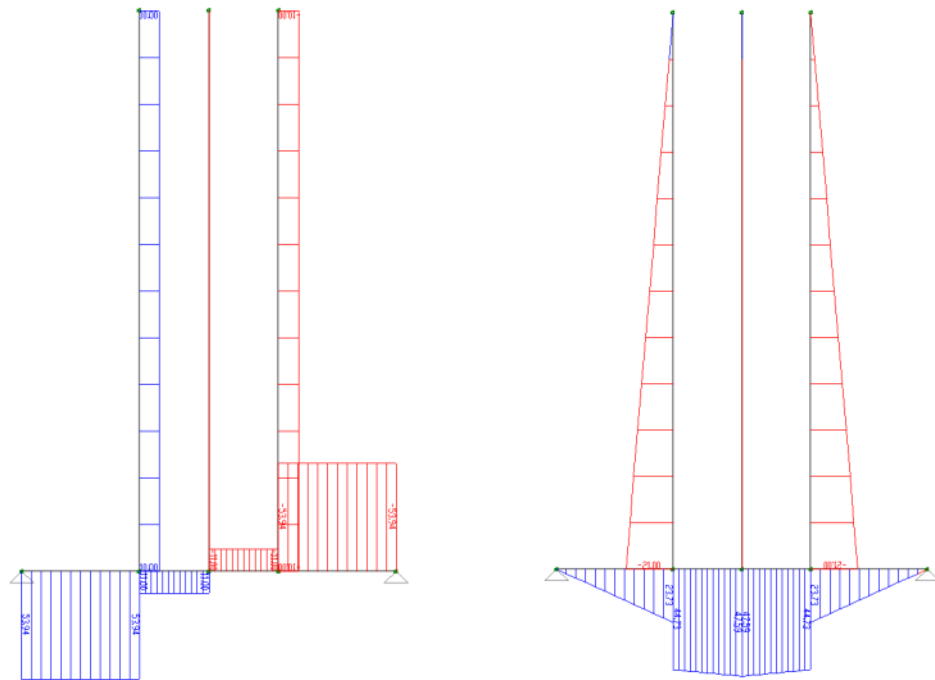


Abbildung 2.3.18

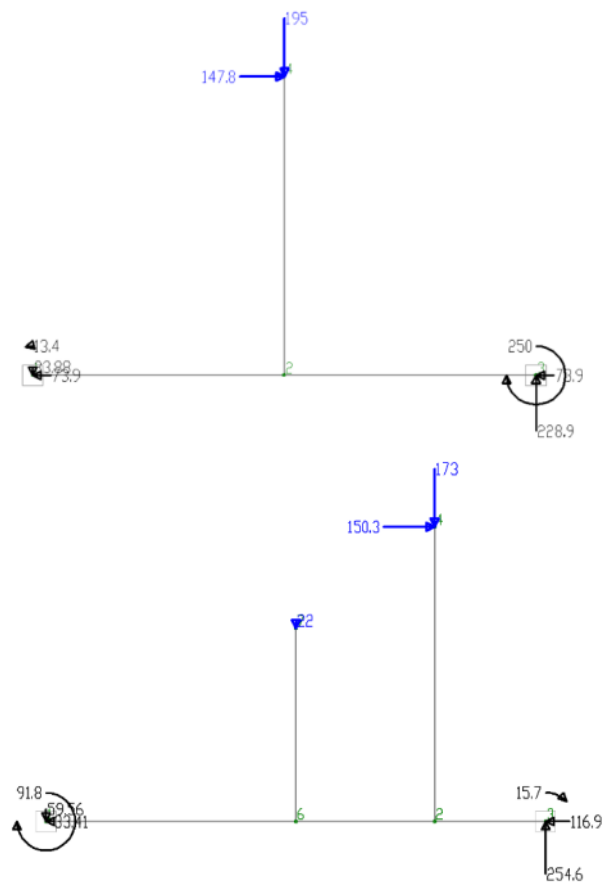
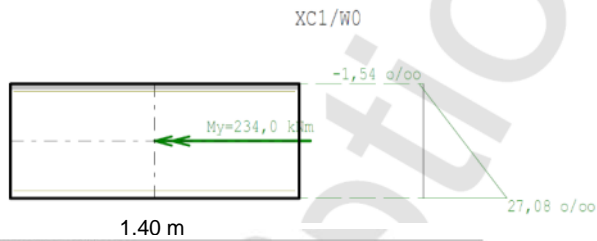


Abbildung 2.3.19

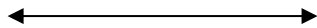
Der Köcher wurde zu einem Balken mit einer Höhe von 55,00 cm vereinfacht. Die Ergebnisse der Biege- und Querkraftbemessung in Querrichtung ist wie folgt angegeben:

BIEGEBEMESSUNG			
kd-Verfahren ( $x/d < 0.450$ )			
$N_{xd} = 0.00$ kN	$M_{yd} = 234.00$ kNm		
$\epsilon_{l1} = -1.54$ o/oo	$\epsilon_{2s} = 25.00$ o/oo		
$x/d = 0.06$	$z/d = 0.98$	$kd = 3.94$	
erforderlich:	$A_{su} = 10.27$ cm <sup>2</sup>	$A_{so} = 0.00$ cm <sup>2</sup>	
	$\mu = 0.13$ %		

Maßstab 1 : 20

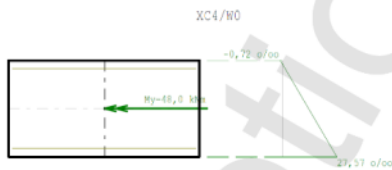


SCHUBBEMESSUNG - QUERKRAFT			
Schubbügel rechtwinklig zur Bauteilachse, Druckspannungen positiv			
$V_{Ed} = 254.00$ kN	$z/d = 0.890$ ( $z < d \cdot 2 \cdot \text{nomc}$ , $\text{nomc} = 2.80$ cm)		
$CR_{d,c} = 0.10$	$k_1 = 0.12$	$\alpha_{cp} = -0.00$ N/mm <sup>2</sup>	
$k_{vmin} = 0.035$	$v_{min} = 0.43$		
$k = 1.63$	$VR_{d,c} = 198.97$ kN (6.2a)		
$As_z = 10.27$ cm <sup>2</sup>	$VR_{d,c} = 306.60$ kN (6.2b)		
$VR_{d,cc} = 498.98$ kN	$\alpha_{cd} = -0.00$ N/mm <sup>2</sup>		
$\cot \theta = 3.00$ (18.43 Grd.)			
$v_1 = 0.750$	$\alpha_{cw} = 1.00$		
$VR_{d,max} = 2836.36$ kN	$aswV = 0.00$ cm <sup>2</sup> /m		
$sl_{max} = 30.00$ cm	$aswMin = 14.38$ cm <sup>2</sup> /m maßgebend !!		



BIEGEBEMESSUNG			
kd-Verfahren ( $x/d < 0.450$ )			
$N_{xd} = 0.00$ kN	$M_{yd} = 48.00$ kNm		
$\epsilon_{l1} = -0.72$ o/oo	$\epsilon_{2s} = 25.00$ o/oo		
$x/d = 0.03$	$z/d = 0.99$	$kd = 7.57$	
erforderlich:	$A_{su} = 7.91$ cm <sup>2</sup>	$A_{so} = 0.00$ cm <sup>2</sup>	
	$\mu = 0.13$ % (MinBg)		

Maßstab 1 : 20



SCHUBBEMESSUNG - QUERKRAFT			
Schubbügel rechtwinklig zur Bauteilachse, Druckspannungen positiv			
$V_{Ed} = 54.00$ kN	$z/d = 0.854$ ( $z < d \cdot 2 \cdot \text{nomc}$ , $\text{nomc} = 4.30$ cm)		
$CR_{d,c} = 0.10$	$k_1 = 0.12$	$\alpha_{cp} = -0.00$ N/mm <sup>2</sup>	
$k_{vmin} = 0.035$	$v_{min} = 0.43$		
$k = 1.63$	$VR_{d,c} = 166.77$ kN (6.2a)		
$As_z = 10.07$ cm <sup>2</sup>	$VR_{d,c} = 237.53$ kN (6.2b)		
$VR_{d,cc} = 368.74$ kN	$\alpha_{cd} = -0.00$ N/mm <sup>2</sup>		
$\cot \theta = 3.00$ (18.43 Grd.)			
$v_1 = 0.750$	$\alpha_{cw} = 1.00$		
$VR_{d,max} = 2096.04$ kN	$aswV = 0.00$ cm <sup>2</sup> /m		
$sl_{max} = 30.00$ cm	$aswMin = 11.30$ cm <sup>2</sup> /m maßgebend !!		

### Biegebewehrung:

Für die Querrichtung wurden 7 Ø 14 gewählt mit  $A_{s,vorh} = 10,70 \text{ cm}^2 > 10,27 \text{ cm}^2 = A_{s,erf}$

Für die Längsrichtung wurden 6 Ø 14 gewählt mit  $A_{s,vorh} = 10,70 \text{ cm}^2 > 7,91 \text{ cm}^2 = A_{s,erf}$

### Querkraftbewehrung:

Für die Querrichtung wurden Ø 12 – 7,5 gewählt mit  $a_{s,vorh} = 15,08 \text{ cm}^2/\text{m} > 14,38 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{s,erf}$

Für die Längsrichtung wurden Ø 12 – 9,0 gewählt mit  $a_{s,vorh} = 12,57 \text{ cm}^2 > 11,30 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{s,erf}$

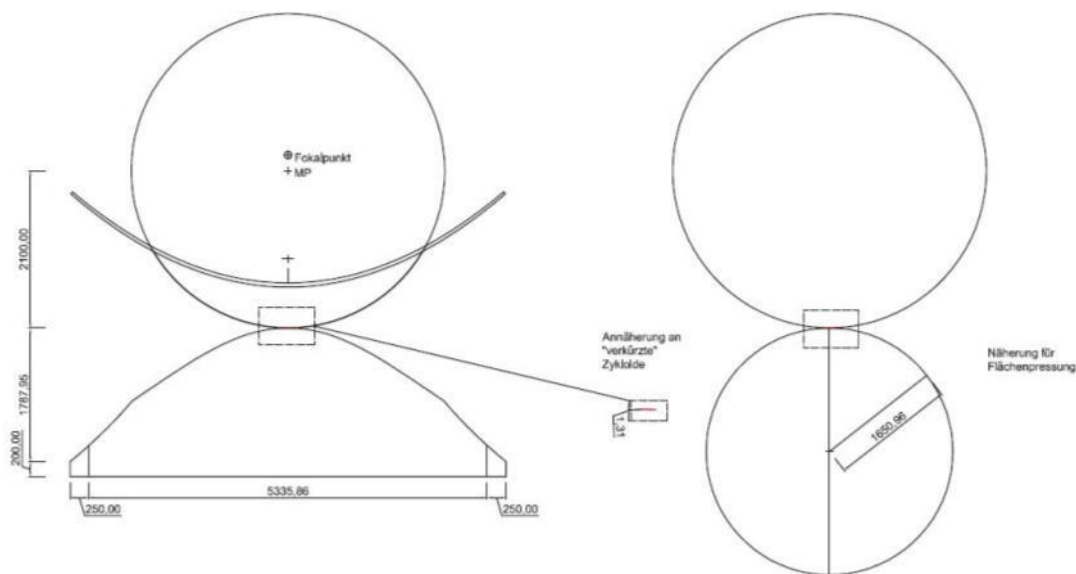
Die Bewehrungsskizzen für die Köcher der Rand- und Mittelaufleger sind Arbeitspaket 1, Abschnitt 14 zu entnehmen.



### 3.5. Nachweis der Flächenpressung der Abrollhügel

Der Abrollhügel lässt sich mathematisch durch eine verkürzte Zykloide annähern, weswegen er zu den Auflagern hin leicht abflacht. Für die Flächenpressung ist die Größe der Kontaktfläche zwischen Sichel und Abrollhügel entscheidend. Die maßgebende Stelle ergibt sich bei der kleinsten Kontaktfläche. Diese stellt sich bei einer Kollektorauslenkung von  $\Phi = 90^\circ$  ein. In dieser Position tritt auch die maßgebende Vertikallast auf.

Geometrisch betrachtet, entspricht die Sichel einem Kreisabschnitt mit dem Radius  $r = 2100,00 \text{ mm}$ , welcher die verkürzte Zykloide (Abrollhügel) berührt. Der Kontaktbereich der Zykloide kann in dieser Stellung näherungsweise durch einen Kreis mit dem Radius  $r = 1650,00 \text{ mm}$  beschrieben werden, siehe Abbildung 2.3.20 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**



**Abbildung 2.3.20**

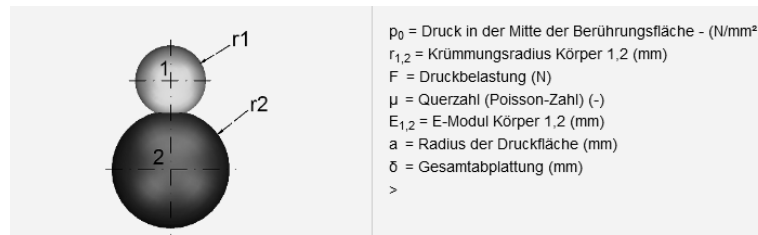
Für die Zahnradfläche wird die Geometrie aus Abbildung 2.3.3 verwendet. Das Zahnrad besteht aus den Radien  $r_1 = 132,85 \text{ mm}$  und  $r_2 = 142,51 \text{ mm}$ . Diese können mit einer jeweiligen Dicke von  $72,00 \text{ mm}$  annähernd als Zylinder beschrieben werden.

Unter Berücksichtigung der Dicke des Abrollhügels kann so die Hertzsche Pressung  $\rho_0$  von zwei Zylindern bestimmt werden

Diese ermittelt sich wie folgt:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{F \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot (1 - \mu^2)}}$$

Die entsprechenden Parameter können Abbildung 2.3.21 entnommen werden.



**Abbildung 2.3.21**

Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Betonage oder der Montage kann nicht garantiert werden, dass sich die Vertikallasten gleichmäßig bzw. anteilig auf Lauffläche und Zahnradfläche der Abrollhügel verteilen. Deshalb wird die volle Vertikallast auf die Lauffläche und auf die Zahnradfläche angesetzt. Daraus ergibt sich folgende Hertz'sche Flächenpressung:

#### Lauffläche Randaufleger:

Angenommen wird eine Querdehnzahl von  $\mu = 0,20$ , ein E-Modul von  $E = 52.700,00 \text{ N/mm}^2$ , eine Laufflächenbreite von  $150,00 \text{ mm}$  bei einer Druckbelastung von  $60,63 \text{ kN}$ .

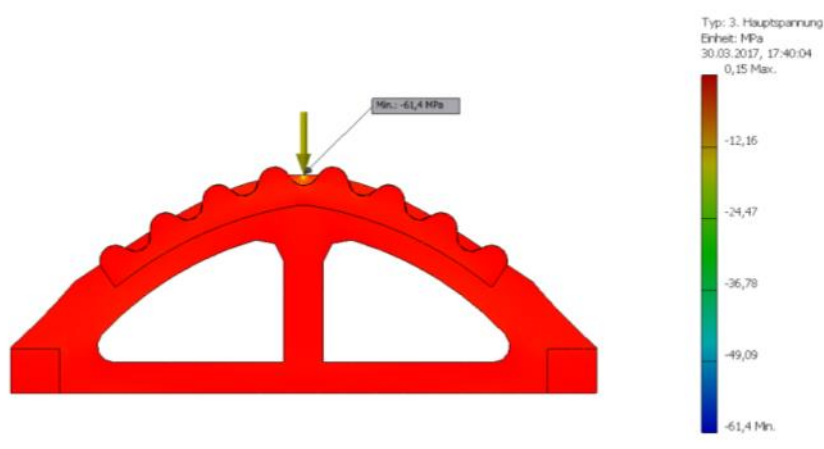
$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{2100 \text{ mm} \cdot 1650 \text{ mm}}{2100 \text{ mm} + 1650 \text{ mm}} = 924,00 \text{ mm}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{60630,00 \text{ N} \cdot 52.700,00 \cdot \text{N/mm}^2}{2 \cdot \pi \cdot 924,00 \text{ mm} \cdot 150,00 \text{ mm} \cdot (1 - 0,20^2)}} = 61,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Berührungsfäche der beiden Zylinder ergibt sich zu:

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - \mu^2) \cdot F \cdot r}{\pi \cdot E \cdot l}} = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - 0,20^2) \cdot 60630,00 \text{ N} \cdot 924,00 \text{ mm}}{\pi \cdot 52.700,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 150,00 \text{ mm}}} \cdot 2 = 8,32 \text{ mm}$$

Eine FEM-Kontrollrechnung unter den oben genannten Parametern ergibt eine Flächenpressung von  $61,40 \text{ N/mm}^2$ .



**Abbildung 2.3.22**

Die Flächenpressung von  $61,82 \text{ N/mm}^2$  kann vom verwendeten Nanodur-Beton mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck} = 131,20 \text{ N/mm}^2$  aufgenommen werden.

### Lauffläche Mittelaufleger

Für die Hertzsche Flächenpressung des Mittelauflegers beträgt die Laufflächenbreite ebenfalls 150,00 mm.

Angenommen wird weiterhin eine Querdehnzahl von  $\mu = 0,20$ , ein E-Modul von  $E = 52.700,00 \text{ N/mm}^2$ , bei einer erhöhten Druckbelastung von 181,89 kN.

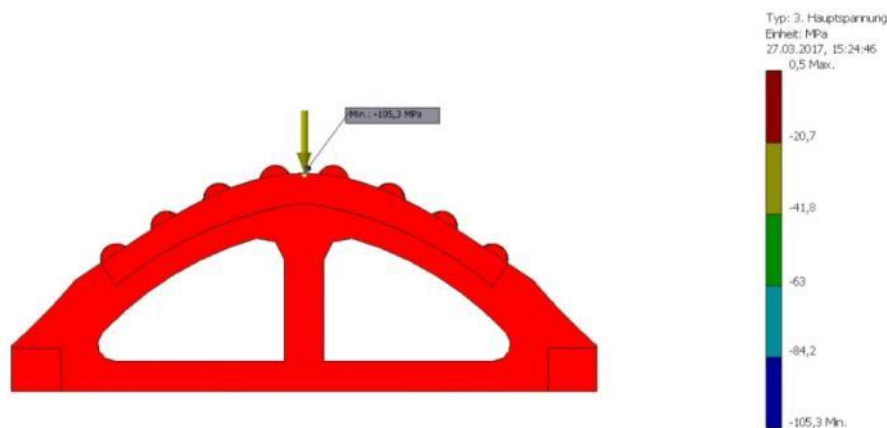
$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{2100 \text{ mm} \cdot 1650 \text{ mm}}{2100 \text{ mm} + 1650 \text{ mm}} = 924,00 \text{ mm}$$

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{181.891,13 \text{ N} \cdot 52.700,00 \cdot \text{N/mm}^2}{2 \cdot \pi \cdot 924,00 \text{ mm} \cdot 150,00 \text{ mm} \cdot (1 - 0,20^2)}} = 107,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Berührungsfläche der beiden Zylinder ergibt sich zu:

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - \mu^2) \cdot F \cdot r}{\pi \cdot E \cdot l}} = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - 0,20^2) \cdot 181.891,13 \text{ N} \cdot 924,00 \text{ mm}}{\pi \cdot 52.700,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 150,00 \text{ mm}}} \cdot 2 = 14,42 \text{ mm}$$

Eine FEM-Kontrollrechnung unter den oben genannten Parametern ergibt eine Flächenpressung von 105,30 N/mm<sup>2</sup>



**Abbildung 2.3.23**

Die Flächenpressung von 107,08 N/mm<sup>2</sup> kann vom verwendeten Nanodur-Beton mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck} = 131,20 \text{ N/mm}^2$  aufgenommen werden.

### Zahnradfläche Mittelaufleger (maßgebend):

Es wird davon ausgegangen, dass die maximale Vertikallast ebenfalls auf die Zahnradfläche des Mittelauflegers wirken kann. Angenommen wird eine Querdehnzahl von  $\mu = 0,20$ , ein E-Modul von  $E = 52.700,00 \text{ N/mm}^2$ , eine Laufflächenbreite von 72,00 mm bei einer Druckbelastung von 181,89 kN.

Über die Formeln der Hertzschen Flächenpressung ergeben sich folgende Werte.

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{132,85 \text{ mm} \cdot (-142,51) \text{ mm}}{132,85 \text{ mm} + (-142,51) \text{ mm}} = 1959,88 \text{ mm}$$

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{181.891,13 \text{ N} \cdot 52.700,00 \cdot \text{N/mm}^2}{2 \cdot \pi \cdot 1959,88 \text{ mm} \cdot 72,00 \text{ mm} \cdot (1 - 0,20^2)}} = 106,12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Berührungsfläche der beiden Zylinder beträgt:

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - \mu^2) \cdot F \cdot r}{\pi \cdot E \cdot l}} = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - 0,20^2) \cdot 181.891,13 \text{ N} \cdot 1959,88 \text{ mm}}{\pi \cdot 52.700,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 72,00 \text{ mm}}} \cdot 2 = 15,15 \text{ mm}$$

Eine FEM-Kontrollrechnung unter den oben genannten Parametern ergibt eine Flächenpressung von 105,50 N/mm<sup>2</sup>.

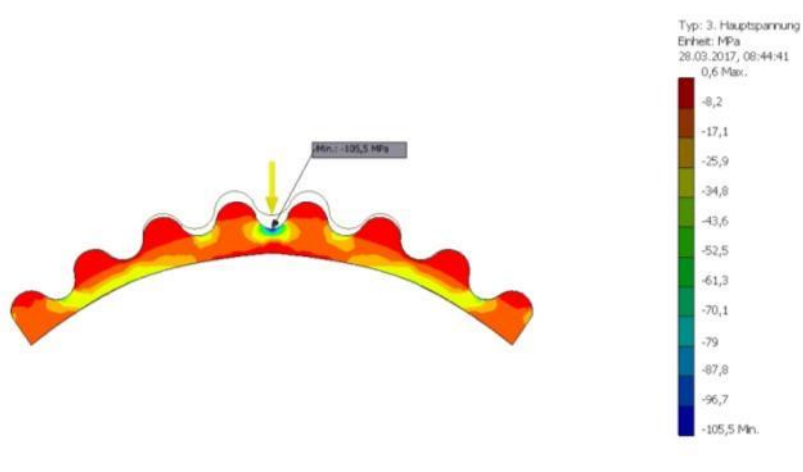


Abbildung 2.3.24

Die Flächenpressung von 106,12 N/mm<sup>2</sup> kann vom verwendeten Nanodur-Beton mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck} = 131,20 \text{ N/mm}^2$  aufgenommen werden.

### Zahnradfläche

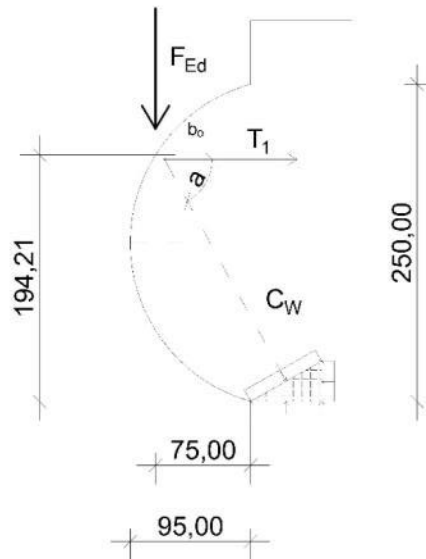
Die Abmessungen des Zahnrades für das Randauflager sind identisch. Hier ist die max. auftretende Vertikallast aber wesentlich geringer (60,63 kN), weswegen das Randauflager nicht maßgebend wird.

## 3.6. Nachweis des Zahnrades

Neben den auftretenden Druckkräften wird das Zahnrad auch einer Zugbelastung ausgesetzt. Der Bemessungsfall geht von der maximal auftretenden Vertikalbelastung aus. Diese ist bei einer Kollektorauslenkung von  $\Phi = 45^\circ$  gegeben. In der 90°- Stellung treten lediglich Druckkräfte auf.

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot 88,58 \text{ kN} + 10,79 \text{ kN} + 1,77 \text{ kN} + 1,5 \cdot 29,37 \text{ kN} = 180,59 \text{ kN}$$

Diese wird mit 75,00% auf das Mittelaufleger angesetzt. Weiter wird auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass sich das Zahnrad genau rechtwinklig zur Vertikalbelastung  $F_{Ed} = 135,45 \text{ kN}$  befindet, siehe Abbildung 2.3.25. Diese Zahnradstellung wird in dem hier beschriebenen Vorhaben nicht erreicht, sondern stellt sich viel flacher ein, was begünstigend wirkt. Somit wird das Zahnrad als Konsole idealisiert.



**Abbildung 2.3.25**

Zur Bemessung der Konsole wird das Bemessungsmodell nach Reineck zugrunde gelegt.

Die Zugkraft  $T_1$  errechnet sich aus dem Hebelarm der Auflagerkraft  $a$  und dem inneren Hebelarm  $z$ , wie folgt:

$$T_1 = \frac{a}{z} \cdot F_{Ed} + H_{Ed}$$

mit:

$$z = d - \frac{x_c}{2} = 194,21 \text{ mm} - \frac{18,90 \text{ mm}}{2} = 184,76 \text{ mm}$$

Für die Begrenzung der Druckzonenhöhe wird vereinfachend ein hochfester C100/115 mit einer Festigkeit von  $f_{cd} = 63 \text{ N/mm}^2$  angesetzt

$$x_c = \left(0,5 - \frac{f_{ck}}{500}\right) \cdot f_{cd} = \left(0,5 - \frac{100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{500}\right) \cdot 63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 18,9 \text{ mm}$$

Der Hebelarm der Auflagerlast ermittelt sich wie folgt:

$$a = a_c + \frac{a_1}{2} = 75,00 \text{ mm} + \frac{31,43 \text{ mm}}{2} = 106,43 \text{ mm}$$

mit:

$$a_1 = \frac{F_{Ed}}{b_c \cdot \sigma_c} = \frac{135450 \text{ N}}{72,0 \text{ mm} \cdot 0,95 \cdot 63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 31,43 \text{ mm}$$

Zur Berücksichtigung behinderter Verformungen ist zusätzlich eine Horizontalkraft  $H_{Ed} = 0,20 \cdot V_{Ed} = 27,09 \text{ kN}$  anzusetzen.

Hieraus ergibt sich die obere Zugkraft  $T_1$  zu:

$$T_1 = \frac{106,43 \text{ mm}}{184,76 \text{ mm}} \cdot 135450 \text{ N} + 27090 \text{ N} = 105,11 \text{ kN}$$

Daraus kann die Hauptzugbewehrung für die Zugstrebe  $T_1$  unter Ansatz des Bemessungswertes der Streckgrenze der Bewehrung  $f_{yd}$  errechnet werden.

$$A_{s1} = \frac{T_1}{f_{yd}} = \frac{105115 \text{ N}}{435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 2,42 \text{ cm}^2$$

gewählte Bewehrung:  $2\emptyset 10 \quad A_{s, \text{vorh}} = 3,14 \text{ cm}^2$

Ab einer Grenze von  $a_c/z \geq 0,5$  sind vertikale Bügel erforderlich, was im Folgenden überprüft wird.

$$\frac{a_c}{z} = \frac{75,00 \text{ mm}}{184,76 \text{ mm}} = 0,41 < 0,50$$

Somit sind keine vertikalen Bügel erforderlich, es handelt sich um eine kurze Konsole handelt.

Die horizontale Bewehrung wird wie folgt ermittelt:

$$A_{b\ddot{u},h} = \frac{0,2 \cdot T_1}{f_{yd}} = \frac{0,2 \cdot 105115 \text{ N}}{435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,48 \text{ cm}^2$$

gewählte Bewehrung:  $2\emptyset 6 \quad A_{s, \text{vorh}} = 1,13 \text{ cm}^2$

### Knotennachweise Konsole

Unter der Lasteinleitungsfläche dürfen die zulässigen Betondruckspannungen nicht überschritten werden.

$$\sigma_c = \frac{T_1}{A_{Lager}} \leq 0,75 \cdot f_{cd} = \frac{105115 \text{ N}}{72,0 \text{ mm} \cdot 40,00 \text{ mm}} = 36,50 \leq 47,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Auflagerfläche wird mit  $72,0 \times 40,0 \text{ mm}$  auf der sicheren Seite liegend angenommen. Die eigentliche Berührungsfläche der Zahnräder würde deutlich über diesem Wert liegen, da hier ein flächigerer Kontakt zugrunde liegt. Die Bogenlänge  $b_o$  (Abbildung 2.3.25) der oberen Kontaktfläche liegt bereits bei  $168,00 \text{ mm}$ .

Die Druckstrebenkraft  $D_2$  am Knoten ergibt sich aus dem Verhältnis von  $T_1$  und  $\cos a$  unter der Berücksichtigung von  $H_d$ . Unter der Annahme von  $a = 60,00$  ergibt sich  $D_2$  zu  $168,12 \text{ kN}$ , wobei der horizontale Anteil  $84,09 \text{ kN}$  und der vertikale Anteil  $145,65 \text{ kN}$  beträgt.

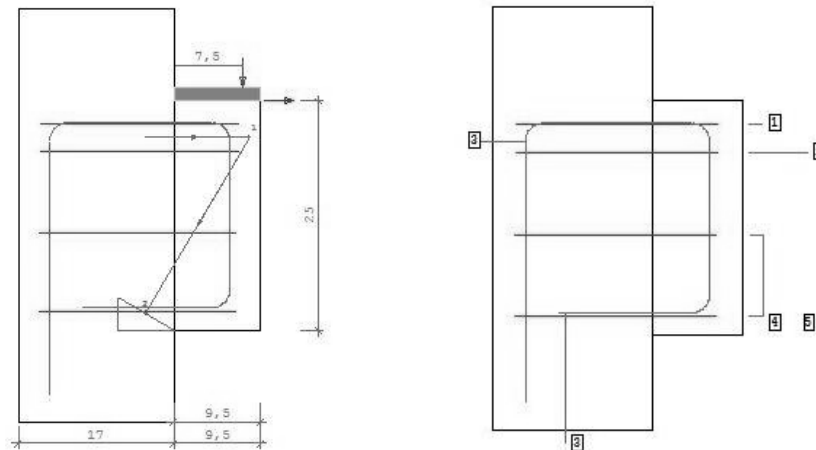
$$\sigma_{c1} = \frac{T_1 \cdot \cos a}{x_c \cdot b_c} \leq 0,95 \cdot f_{cd} = \frac{84092 \text{ N}}{18,90 \text{ mm} \cdot 72,00 \text{ mm}} = 61,80 \leq 59,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c2} = \frac{T_1 \cdot \sin a}{a_1 \cdot b_c} \leq 0,95 \cdot f_{cd} = \frac{145651 \text{ N}}{31,43 \text{ mm} \cdot 72,00 \text{ mm}} = 64,36 \leq 59,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c3} = \frac{T_1}{(\sqrt{x_c^2 + a_1^2}) \cdot b_c} \leq 0,95 \cdot f_{cd} = \frac{168120 \text{ N}}{36,73 \text{ mm} \cdot 72,00 \text{ mm}} = 63,57 \leq 59,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Nachweise können knapp nichteingehalten werden. Der Bemessung wurde ein C100/115 zugrunde gelegt. In der Bauausführung wird ein hochfester Beton mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck} = 131,20 \text{ N/mm}^2$  verwendet.

Wahl der Bewehrung:



Pos 1,2:  $2\emptyset 10 \quad A_{s,vorh} = 3,14 \text{ cm}^2$

Pos 4,5:  $2\emptyset 6 \quad A_{s,vorh} = 1,13 \text{ cm}^2$

Pos 3:  $1\emptyset 8 \quad A_{s,vorh} = 0,50 \text{ cm}^2$  (Längsbügel, konstruktiv)

Für die genauen Bewehrungspläne siehe Arbeitspaket 1, Abschnitt 14.

### 3.7. Anmerkung

In der statischen Berechnung ist hier fälschlicherweise der Abminderungsfaktor für Wind mit 0,5 angesetzt worden. Richtigerweise muss es  $\psi_{0,i} = 0,6$  lauten. Dadurch ergibt sich die Vertikallast der ständigen und vorübergehenden Einwirkungskombination mit der Leiteinwirkung Wind zu:

$$\begin{aligned} V_d &= 1,35 \cdot (88,58 \text{ kN} + 10,79 \text{ kN} + 1,77 \text{ kN}) + 1,5 \cdot 46,67 \text{ kN} + 1,5 \cdot 47,32 \text{ kN} \cdot 0,6 \\ &= 249,13 \text{ kN} \end{aligned}$$

und nicht wie in der statischen Berechnung angegeben zu:

$$\begin{aligned} V_d &= 1,35 \cdot (88,58 \text{ kN} + 10,79 \text{ kN} + 1,77 \text{ kN}) + 1,5 \cdot 47,32 \text{ kN} + 1,5 \cdot 46,67 \text{ kN} \cdot 0,5 \\ &= 242,52 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hier galt noch Schnee als Leiteinwirkung. Somit ergibt sich eine Abweichung der Vertikallast von 6,61 kN. Diese Belastung wirkt anteilig auf die jeweiligen Abrolllager:

- $V_{d,MA} = 0,75 \cdot 249,13 \text{ kN} = 186,84 \text{ kN}$  (anstelle von 181,89 kN), Abweichung: 4,95 kN
- $V_{d,RA} = 0,25 \cdot 249,13 \text{ kN} = 62,28 \text{ kN}$  (anstelle von 60,63 kN), Abweichung: 1,65 kN

Die relativ geringen Abweichungen bei der Vertikallast haben keinen Einfluss auf die bislang erfolgten Nachweise. Die hier bemessenen Fundamente und Köcher sind bereits mit der korrekten Vertikallast bemessen worden.



## 4. Definition der Kollektorhalterungen (auch Pylone), flexible Verbindungen usw. (Material, Gewicht, Kosten, Verfügbarkeit, Montage)

### Flexible Rohrverbindung (Rotation and Expansion Performing Assembly – REPA)

#### Allgemeine Anforderungen an die REPA

Die REPA ist das Verbindungselement zwischen dem sich bewegenden Absorberrohr und der ortsfesten Feldverrohrung. Sie ermöglicht es, die rotierende Bewegung der Parabolrinne aufzunehmen und die thermische Ausdehnung des Absorberrohres zu kompensieren. Es wird jeweils am Eintritt und am Austritt eines Kollektors (Solar Collector Assembly – SCA) solch eine Einheit benötigt. Für einen Kollektorstrang werden vier Einzelsysteme (Ein- und Austritt Kollektorstrang) und vier Doppelsysteme (zwischen zwei Kollektoren) benötigt (Abb. 2.4.1 und Abb. 2.4.2).

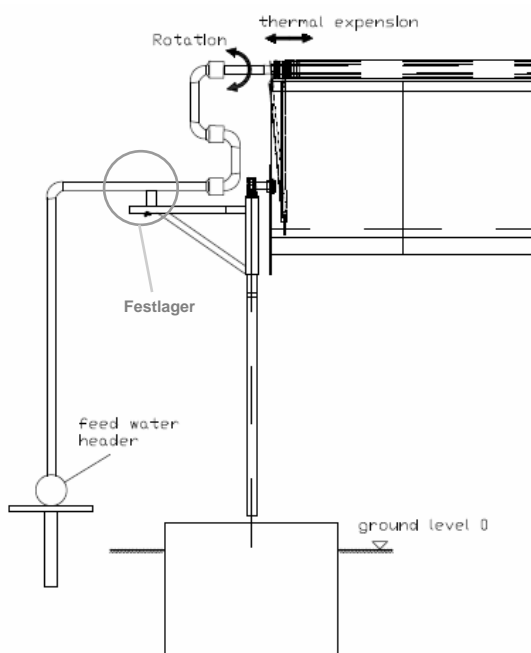


Abbildung 2.4.1: Einzelsystem REPA

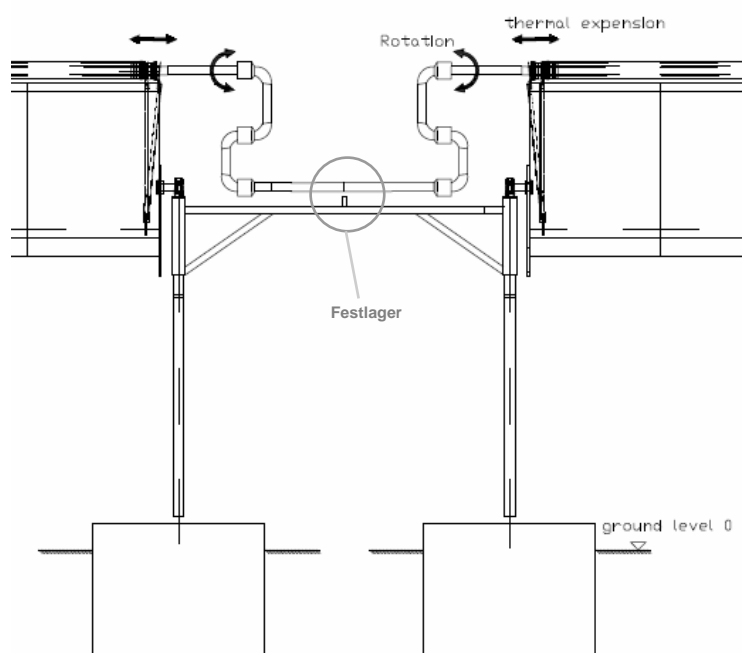


Abbildung 2.4.2: Doppelsystem REPA

## REPA-Varianten

Zwei Systeme werden heute flächendeckend in Parabolrinnenkraftwerke eingesetzt. Das am häufigsten verbaute System verwendet Kugelgelenke (Abb. 2.4.3)<sup>1</sup> zur Aufnahme der beiden Bewegungsrichtungen des Absorberrohrs. Es werden für das Einzelsystem REPA drei Kugelgelenke benötigt, die mit starren Rohren verschweißt werden. Die Kombination von drei Kugelgelenken ermöglicht es durch die freie Beweglichkeit des Gelenkkopfes in Rotationsrichtung und einen Freiheitsgrad von  $16,5^\circ$  in vertikaler Richtung (pro Gelenk), die beiden Bewegungsmechanismen des Parabolrinnenkollektors aufzunehmen. Die Kugelgelenke werden in zwei verschiedenen Druckklassen angeboten. 55 bar und  $400^\circ\text{C}$  aus C-Stahl und für höhere Parameter 120 bar und  $550^\circ\text{C}$  aus Edelstahl. Die Nachteile dieses Systems liegen bei dem hohen Losbrechmoment der Gelenke und deren Gewicht.

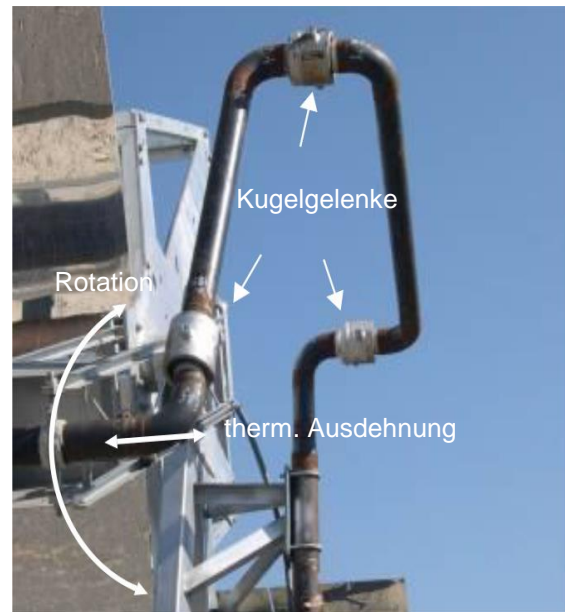


Abbildung 2.4.3: REPA mit Kugelgelenken

Das zweite System besteht aus einem Wellenschlauch und einem Drehgelenk (Abb. 2.4.4)<sup>2</sup>. Bei diesem System werden die Rotationsbewegung des Kollektors mittels des Drehgelenks und die Bewegung in der Ausdehnungsrichtung mittels des flexiblen Wellenschlauchs aufgenommen. Ein Einzelsystem besteht aus einem Wellenschlauch und einem Drehgelenk. Für ein Doppelsystem wird nur ein Drehgelenk und zwei Wellenschläuchen benötigt. Die Drehgelenke haben den Vorteil, dass sie nur ein sehr geringes Losbrechmoment besitzen. Der Nachteil dieses Systems liegt in der geringen Temperaturbeständigkeit. Diese ist begrenzt bei 80 bar auf  $280^\circ\text{C}$ .

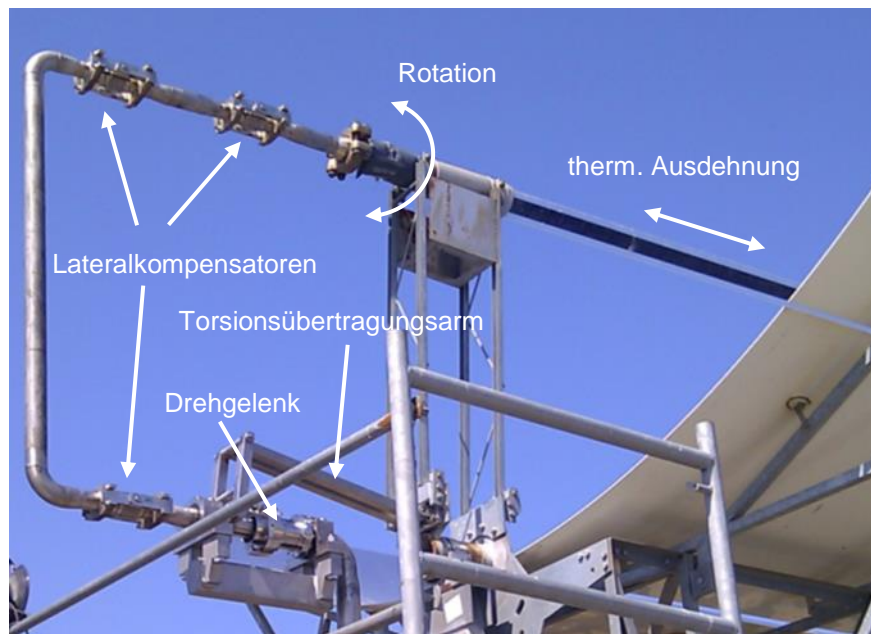


Abbildung 2.4.4: REPA mit Wellenschlauch

<sup>1</sup> Prahl Christopher (DLR), Antriebsvarianten.pptx, 2016

<sup>2</sup> Prahl Christopher (DLR), Antriebsvarianten.pptx, 2016

Ein weiteres System befindet sich gerade in der Entwicklung und wird von der Firma Witzenmann verfolgt. Dieses besteht aus drei Lateralkompensatoren und einem Drehgelenk für ein Einzelsystem (Abb. 2.4.5)<sup>3</sup>. Wie bei dem Wellschlauch-System wird die Rotationsbewegung durch das Drehgelenk aufgenommen und die thermische Ausdehnung durch die Lateralkompensatoren. Die Kompensatoren werden durch starre Rohre miteinander verschweißt. Der Unterschied zu dem Wellschlauch-System besteht in der möglichen Druck- und Temperaturbeständigkeit. Dieses System kann bis 100bar und 550°C eingesetzt werden. Diese hohen Prozessparameter können nur durch die Verwendung einer besonderen Edelstahlgierung (Inconel 625) erreicht werden.



**Abbildung 2.4.5: REPA mit Lateralkompensatoren**

### **Gegenüberstellung REPA-Varianten**

Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der drei oben beschriebenen Varianten in Bezug auf Prozessparameter, auftretende Kräfte und Kosten. Alle drei Systeme wurden so ausgelegt, dass sie sich im gleichen Prozessparameterbereich befinden und für eine Direktverdampfung geeignet sind. Es ist zu erkennen, dass die Kugelgelenkvariante das höchste Losbrechmoment und Gewicht ausweist. Dies führt zu einer erhöhten Anforderung an die Receiverhalterung, um die auftretenden Kräfte störungsfrei in den Kollektor einzuleiten. Jedoch steht dieser erhöhte Aufwand nicht im Vergleich zu den spezifischen Kosten. Die Kugelgelenkvariante ist nämlich um ein vierfaches günstiger als die beiden anderen Varianten. Siehe folgende Tabelle.

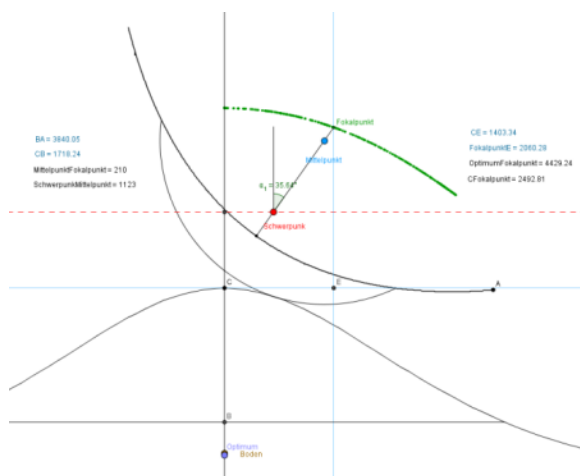
<sup>3</sup> Gehring Matthias (Witzenmann GmbH), 160815\_Three hinge system.ppt, 2016

**Tabelle 2.4.1: Varianten Gegenüberstellung REPA**

	Kugelgelenk	Wellschlauch mit Drehgelenk	Kompensatoren mit Drehgelenk
Prozessparameter	400° C ; 55 bar Stahl 550° C ; 120 bar Edelstahl	400° C ; 35 bar Angabe Witzenmann für gebaute Fresnel-Anlage	550° C ; 100 bar Inconel 625 und Edelstahl
Gewicht	9 kg pro Kugelgelenk (3x) ~ 6,1 m Rohr (2 1/2" Sch40) ~ 11,5 kg/m Rohr <b>gesamt ~ 97 kg</b>	~ 5m Wellschlauch ~ 4,85 kg/m <b>gesamt ~ 29 kg</b>	~ 4,5 kg pro Lateralkompensator ~ 5 m Rohr (2 1/2" 1.4571) ~ 6,6 kg/m Rohr <b>gesamt ~ 47 kg</b>
Kräfte	Losbrechmoment pro Kugelgelenk = 305 Nm	gering	gering
Schweißaufwand	6 Nähte	2 Nähte	6 Nähte
Kosten Einzelsystem	~ 250 €/Kugelgelenk ~ 14 €/m Rohr <b>gesamt ~ 835 €</b>	Angabe Witzenmann beinhaltet Wellschlauch + Drehgelenk <b>gesamt ~ 5.500 - 6.000 €</b>	Angabe Witzenmann beinhaltet 3 Kompensatoren + Drehgelenk + Verrohrung <b>gesamt ~ 6.000 €</b>
Kosten Doppelsystem	~ 250 €/Kugelgelenk ~ 14 €/m Rohr <b>gesamt ~ 1.670€</b>	Angabe Witzenmann beinhaltet 2x Wellschlauch + Drehgelenk <b>gesamt ~ 9.000 - 10.000 €</b>	Angabe Witzenmann beinhaltet 6 Kompensatoren + Drehgelenk + Verrohrung <b>gesamt ~ 10.000 - 12.000 €</b>
€/m² für Installation, Isolation, Transport...	~ 1,8 €/m²	~ 1,8 €/m²	~ 1,8 €/m²
€/m² für 104 loops (510.120 m²)	Gesamtpreis: ~ 1.042.000 € → ~ 2,1 €/m²	Gesamtpreis: ~ 6.344.000 € → ~ 12,4 €/m²	Gesamtpreis: ~ 7.072.000 € → ~ 13,9 €/m²
gesamt €/m²	~ 3,9 €/m²	~ 14,2 €/m²	~ 15,7 €/m²

### Besonderheit ConSol-Kollektor

Durch den Abrollmechanismus der Betonrinne ergibt sich eine besondere Anforderung an die flexible Rohrverbindung. Die REPA muss nicht nur wie bei den herkömmlichen Parabolrinnen zwei Ebenen der Absorberrohrbewegung (thermische Ausdehnung und Rotation) kompensieren, sondern noch eine zusätzliche Längenänderung in der Rotationsebene bewältigen. Diese resultiert aus der nicht kreisförmigen Bewegung des Betonkollektors (Abb. 2.4.6<sup>4</sup> grüne Verlaufslinie Absorber und Tab. 2.4.2<sup>5</sup>, Erstellt von der TUKL).



**Abbildung 2.4.6: Schematische Darstellung der Abrollgeometrie**

**Tabelle 2.4.2: Abstände zum Fokuspunkt**

	Abstände zum Fokuspunkt			Maximum [mm]
	Fokuspunkt - C [mm]	Fokuspunkt - B [mm]	Fokuspunkt - Boden [mm]	Minimum [mm]
$\alpha$ [°]				Fokuspunkt - Optimum [mm]
0	2310	4028	4428	4451
5	2309	4026	4425	4448
10	2322	4026	4425	4447
15	2342	4028	4424	4446
20	2365	4026	4419	4441
25	2399	4027	4416	4438
30	2441	4029	4413	4435
35	2486	4030	4408	4429
40	2539	4033	4404	4425
45	2598	4037	4401	4422
50	2665	4044	4400	4420
55	2737	4053	4400	4419
60	2815	4065	4401	4421
65	2898	4080	4406	4425
70	2987	4099	4414	4432
75	3082	4123	4426	4443
80	3183	4152	4443	4460
Differenz [mm]	874	126	43	40
Differenz [cm]	87	13	4	4

<sup>4</sup> Dipl.-Ing. Penkert Sebastian (RUB), Abstand Fokalfunkte.xlsx, 2016

<sup>5</sup> Dipl.-Ing. Penkert Sebastian (RUB), Abstand Fokalfunkte.xlsx, 2016

Folgende Abbildungen zeigen den Lösungsansatz für den ConSol-Kollektor mit Kugelgelenken.

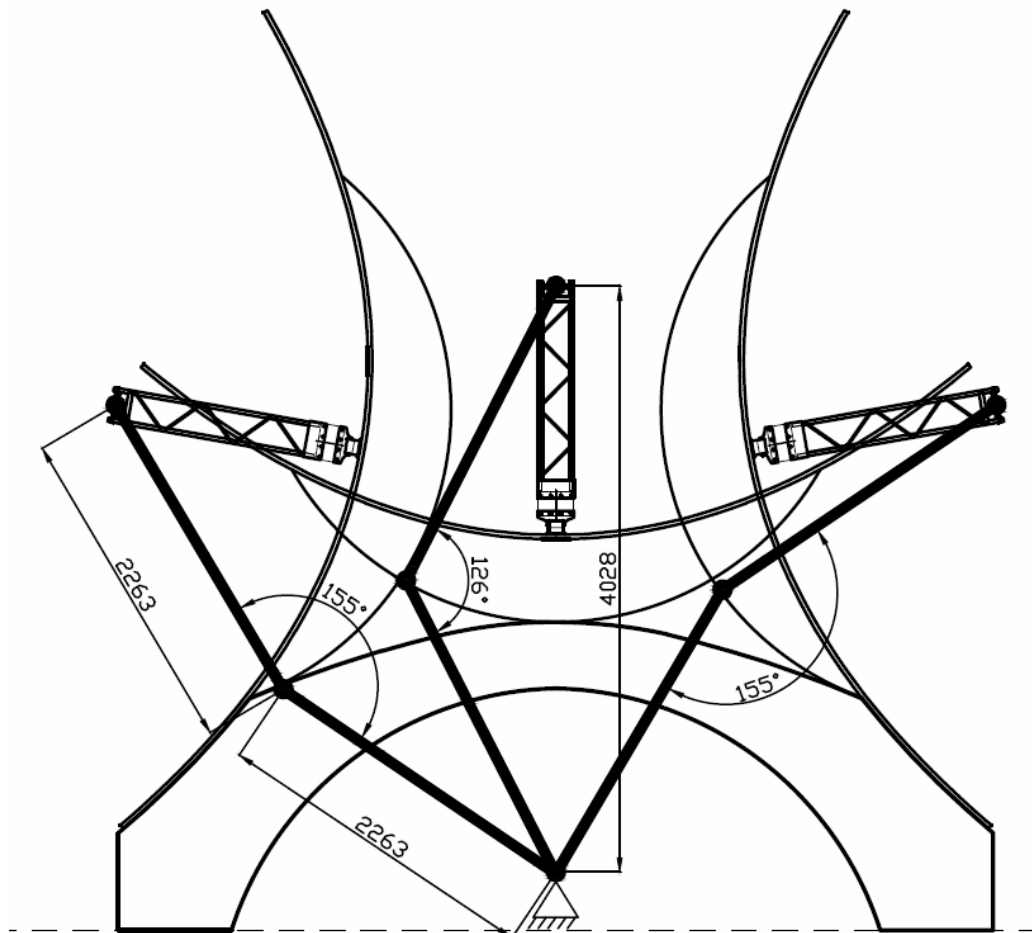
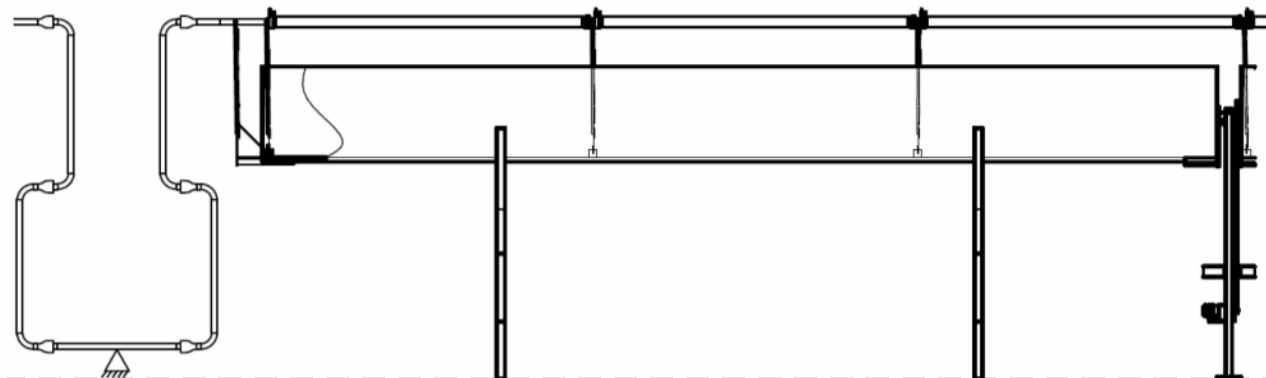
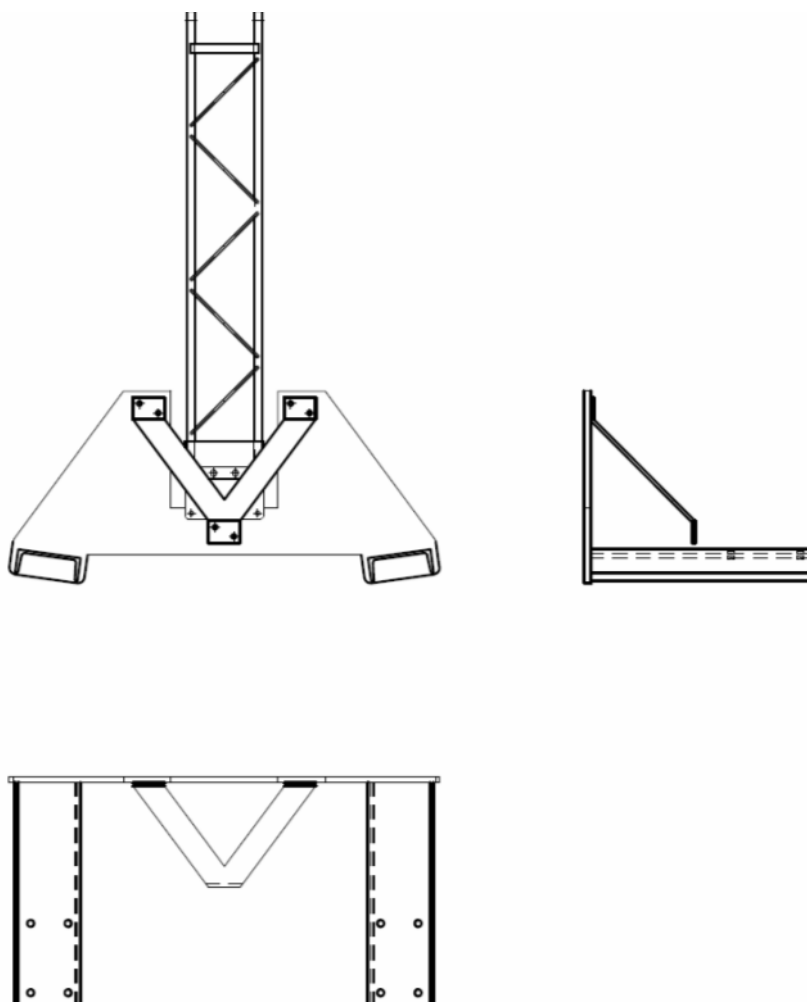


Abbildung 2.4.7: Vorderansicht ConSol-Kollektor mit Kugelgelenken



**Abbildung 2.4.8: Seitenansicht ConSol-Kollektor mit Kugelgelenken**



**Abbildung 2.4.9: Anschlagteil End-Receiver-Halter**

## Receiver-Halterung

Receiver-Halterungen sind ein kritisches Element, die die Funktionsweise und den Wirkungsgrad des Kollektors wesentlich beeinflussen können. Die Stützkonstruktion muss die thermisch bedingte Ausdehnung und Schrumpfung des Receivers ausgleichen und gleichzeitig so starr ausgeführt werden, dass der Receiver in jeglicher Kollektorposition in der Fokallinie gehalten wird. Ein Receiver-Halter besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten, siehe Abbildung 2.4.10.

1. Bewegungselement oben: Receiver-Klemme  
Verbindung zwischen Receiver und Receiver-Halter. Muss beweglich gelagert sein, um die thermische Ausdehnung und Schrumpfung des Receivers zu kompensieren
2. Stahlgestell
3. Bewegungselement unten: Federblech  
Zur Kompensation der thermische Ausdehnung und Schrumpfung des Receivers
4. Receiver-Halter-Fuß Verbindung zwischen Receiver-Halter und Kollektorstruktur

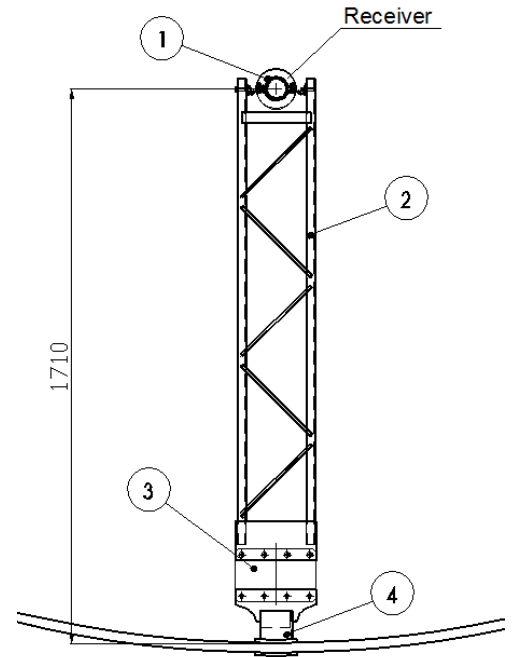


Abbildung 2.4.10: Konzept Receiver-Halter

Die Receiver-Halterung, für den ConSol-Kollektor, soll aus folgenden Einzelteilen gefertigt werden, siehe Tabelle 2.4.4.

Tabelle 2.4.4: Stückliste Receiver-Halter

Pos.	Name	quant.	Profil	Material	Länge	Gewicht
1	Vierkantring	2	Ø25*2,5	S275JR	970	4,77
2	Flachstahl	1	FL120*10	S275JR	250	2,30
3	Rundstahl	3	Rund Ø8	S275JR	300	0,36
4	Flachstahl	1	FL30*10	S275JR	215	0,50
5	Federblech	1	FL250*2,5	1.4310	165	0,80
6	Fußteil 1	1	FL120*12	S275JR	250	1,50
7	Fußteil 2	1	Ø100*100*4	S275JR	98	1,40
8	Receiver-Halter Klemme	1	Fornteil	1.4301	297	0,50
-	Verschraubung	1	-	-	-	~1,5
Gesamtgewicht (kg)						13,63

Um die thermische Ausdehnung/Schrumpfung des Receivers auszugleichen wird im oberen Bereich des Halters eine Klemme aus Edelstahl (1.4301) verwendet, die beweglich an die Stahlstruktur angeschlossen ist (Bolzen-Splint-Verbindung). Im unteren Bereich wird die Auslenkung mittels eines Federbleches realisiert. Das Federblech soll dem Chrom-Nickellegierten Stahl X10CrNi18-8, oder äquivalent gefertigt werden. Folgende Eigenschaften muss der Stahl mindestens aufweisen: Zugfestigkeit  $R_m=1.300\text{MPa min.}$ , Qualität +C1.300, Oberflächenqualität 2H.

## 5. Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung

An der Technischen Universität Kaiserslautern werden insgesamt dreiundzwanzig Bauteile für den Demonstrator gefertigt. Dabei handelt es sich um sieben unterschiedliche Bauteilkomponenten, siehe Tabelle 2.5.1. Hier können auch die jeweilige Bauteilanzahl und das Herstellungsmaterial entnommen werden. Der reine Herstellungsprozess hat insgesamt circa 6 Monate beanschlagt.

**Tabelle 2.5.1**

<b>Nr.</b>	<b>Typ</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Material</b>
1	Köcher Randaufleger	2	C35/45
2	Köcher Mittelaufleger	4	C35/45
3	Zahnrad unten	4	Nanodur®-Beton
	Lauffläche unten		
4	Sichel	4	Nanodur®-Beton
5	Zahnrad oben	4	Nanodur®-Beton
6	Abrollhügel	4	Nanodur® und C35/45
7	Antriebsbock	1	C35/45
	<b>Summe</b>	<b>23</b>	

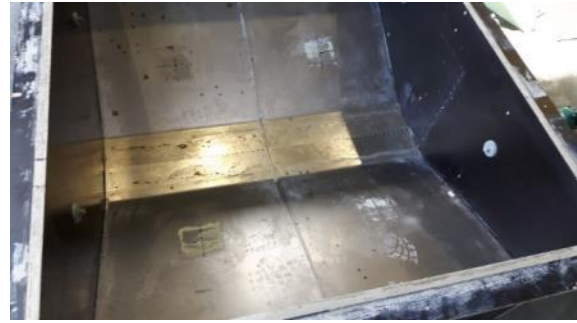
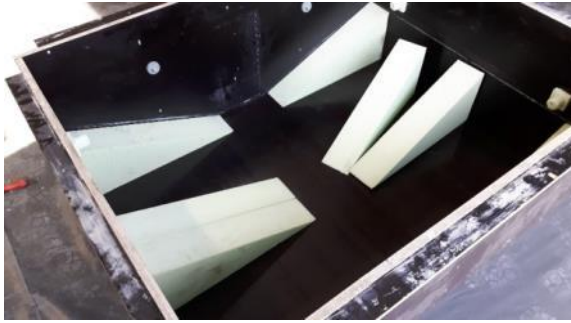
Der Prüfbericht über die bautechnischen Nachweise lag seit der 29. KW 2017 vor. Anhand der geprüften Statik konnte nun der eigentliche Bau des Demonstrators beginnen. Im ersten Schritt wurden die Bewehrungspläne (siehe Arbeitspaket 1.2) gemäß der geprüften statischen Berechnung aktualisiert und entsprechende Bewehrungsmengen bestellt.

### 5.1. Herstellung der Fundamente

Das Projekt begann mit der Schalungsherstellung für die beiden Köcherfundamente (Rand- und Mittelaufleger). Die genauen Abmessungen und Verbindungsmittel können den Schal- und Montageplänen entnommen werden, siehe Arbeitspaket 1.2, Abschnitt 14: Schal-, Bewehrungs- und Montagepläne.

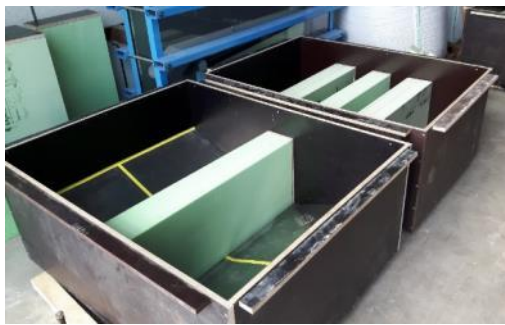
Zuerst wurden zwei rechteckige Holzschalungen mit den Abmessungen 1,40 x 1,10 m sowie eine Schalung mit den Abmessungen 1,40 x 1,00 m erstellt, siehe Abbildung . In die Holzschalung wurden jeweils sechs dreieckige Styrodurkörper eingebracht und längs der Schalung verteilt. Auf diesen Elementen wurden jeweils zwei speziell gebogene Edelstahlbleche gelegt. Somit konnte die exakte Form der Köcher bei der Betonage abgebildet werden, siehe Abbildung 2.5.1. Zusätzlich sind Nagelteller in der Schalung zu erkennen an denen später die Transportanker (4 Stück pro Köcher) befestigt wurden.





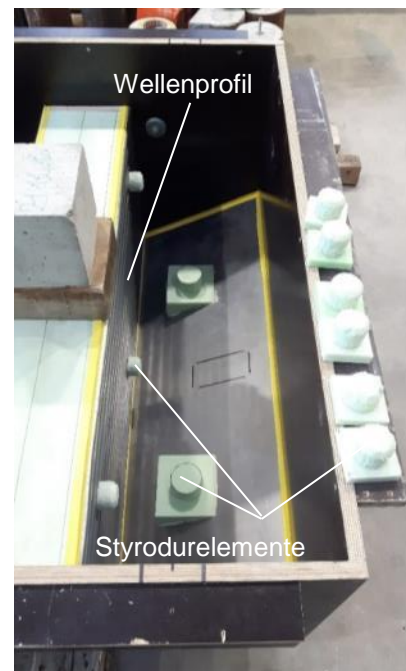
**Abbildung 2.5.1**

Anschließend wurden Styrodurquader in die Köcherschalung eingebracht. Die Mittelaufleger besitzen jeweils ein Quader, an dem später der Abrollhügel montiert werden kann. Die Randaufleger sind mit drei Quadern versehen, neben den zwei Abrollhügeln muss zusätzlich der Antriebsbock platziert werden können, siehe Abbildung 2.5.2. Die Montage erfolgt über horizontale Gewindestangen sowie einen Mörtelverguss. Um einen guten Verbund der Bauteile zu gewährleisten wird mittels Wellenprofilblech eine Verzahnung geschaffen, siehe Abbildung 2.5.3.



**Abbildung 2.5.2**

Ebenfalls zu erkennen sind kleinere Styrodurelemente, an denen später die vertikalen sowie horizontalen Hüllrohre befestigt werden. Die Bewehrungskörbe wurden anhand der statischen Berechnung hergestellt. Dabei ist zwischen den Bewehrungskörben eines Randauflegers (Abbildung 2.5.4, rechts) und eines Mittelauflegers (Abbildung 2.5.4, links) zu unterscheiden.



**Abbildung 2.5.3**

In Abbildung 2.5.4 ist zusätzlich ein horizontales Hüllrohr zu erkennen. Dieses wurde vorab in den Bewehrungskorb eingebracht, da ein nachträglicher Einbau aufgrund des hohen Bewehrungsgrades nicht möglich war. Nach der Betonage können die Gewindestangen zur Montage an den Abrollhügel entlang der Hüllrohre eingeschoben werden.



**Abbildung 2.5.4**

Die Bewehrungskörbe wurden dann in die Schalung eingelegt, siehe Abbildung 2.5.5. Hier sind auch die vertikalen Hüllrohre zu erkennen, welche an einer Holzlattung aufgehängt sind. Nach der Betonage können die Köcher über Gewindestangen auf die Blockfundamente des Baufeldes gestellt werden. Zwischen Blockfundamenten und Köcher wird ein etwa 5,00 cm größer Spalt sein, der Köcher liegt auf vier Futterplatten auf, welche über Gewindestangen fixiert werden. Somit ist ein exaktes Ausrichten der Bauteile möglich und eine hohe Effektivität der Parabolrinne kann gewährleistet werden. In Abbildung 2.5.6 sind zwei Köcher für das Mittelaufleger und ein Köcher für das Randaufleger zu sehen. Insgesamt erfolgten zwei Betonagen zur Herstellung der sechs Bauteile. Hierfür wurde Transportbeton verwendet. Als Beton wurde ein C35/45 gewählt, gemäß Statik.



**Abbildung 2.5.5**



**Abbildung 2.5.6**

## **5.2. Herstellung Abrollhügel**

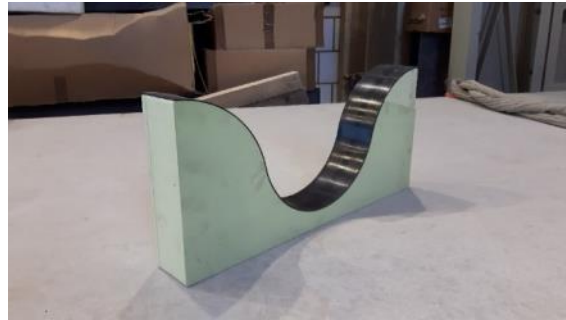
Im nächsten Bauabschnitt erfolgte die Herstellung der unteren Verzahnung inklusive Lauffläche. Diese wird vollständig aus Nanodur®-Feinkornbeton hergestellt und ist Teil des Abrollhügels.

Dafür wurde eine dreilagige Schalung aus Styrodur verwendet, siehe Abbildung 2.5.7. Die beiden unteren, jeweils 80 mm starken Styrodurelemente sind Teil der Lauffläche. Die obere 80 mm starke dritte Lage bildet die Verzahnung aus. Alle Elemente sind mittels Wasserstrahlgerät oder 3D-Heizdraht geschnitten worden. Als Trennschicht zwischen Schalung und Beton wurde eine Gummierung auf dem Styrodur geklebt, siehe Abbildung 2.5.8. Die Gummierung ist mit einer Gewebeeinlage verstärkt um eine mehrmalige Wiederverwendung zu garantieren. Zusätzlich soll sie sich nicht infolge der Hydratationswärme des Betons verformen, was bei bislang verwendeten Folien der Fall war. Bei der Verzahnung muss eine voll-

ständig glatte Oberfläche entstehen, damit beim Abrollvorgang keinerlei Spannungsspitzen auftreten und das Zahnrad beschädigen.

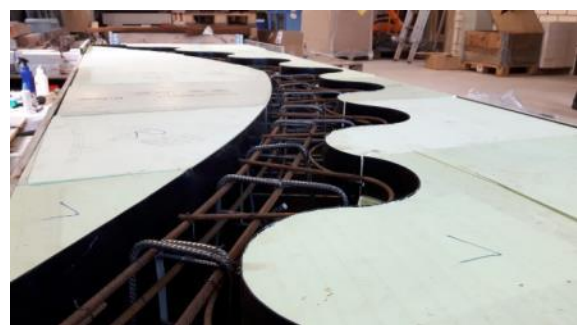


**Abbildung 2.5.7**



**Abbildung 2.5.8**

Die Bewehrung wurde direkt in der Schalung eingebaut, siehe Abbildung 2.5.9. Dabei wurden entlang der des Zahnrades abgewandten Seite kleinere Aussparungen in das Styrodur eingebracht. Die hier angebrachten Bügel dienen als Anschlussbewehrung, um später mit dem Rest des Abrollhügels verbunden werden zu können.



**Abbildung 2.5.9**

Die Verzahnung wurde anschließend mit einer Mikrobewehrung verstärkt (siehe Abbildung 2.5.10), diese wurde zweilagig entlang der Verzahnung angebracht. Für die Betonage sind alle Schalungselemente mit Dichtungsbändern und Gewichten versehen worden. Somit wurde eine vollständig geschlossene Schalung geschaffen, aus der kein Nanodur®-Feinkornbeton austreten kann, siehe Abbildung 2.5.11. Mehrere Schraubzwingen in Querrichtung wirkten dem Schalungsdruck entgegen und verstärken die Schalung zusätzlich.



**Abbildung 2.5.10**



**Abbildung 2.5.11**

Abbildung 2.5.14 zeigt das vollständig betonierte Bauteil in der Schalung liegend. An den beiden Enden des Bauteilbogens ist eine zusätzliche Anschlussbewehrung für einen besse-



ren Verbund mit dem restlichen Abrollhügel vorgesehen. Diese wird durch jeweils vier Durchmesser  $\varnothing = 12$  mm Bewehrungsstäben abgedeckt, siehe Abbildung 2.5.12. In die Schalung wurde entlang der Lauffläche zusätzlich ein Edelstahlblech eingelegt. An dieses wurden Muttern angeschweißt. Dadurch verbindet sich das Blech bei der Betonage mit dem Beton. Das Blech verteilt die Lasten der Rinne gleichmäßig auf die Lauffläche und reduziert die Hertzsche Flächenpressung auf den Beton, siehe Abbildung 2.5.13.



**Abbildung 2.5.12**



**Abbildung 2.5.13**

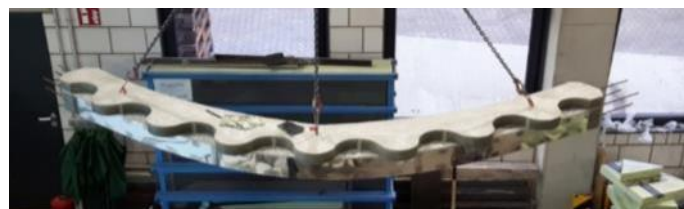


**Abbildung 2.5.14**

In Abbildung 2.5.15 ist die Anschlussbewehrung für den Abrollhügel zu erkennen. Das Edelstahlblech wird in einem nächsten Schritt angeraut. Hierdurch soll beim Abrollen der Sichel auf dem Abrollhügel einem Gleiten der Oberbauten entgegengewirkt werden. Abbildung 2.5.16 zeigt das vollständig ausgeschaltete Bauteil.



**Abbildung 2.5.15**



**Abbildung 2.15.16**

Im nächsten Herstellungsprozess erfolgte die Fertigung der vollständigen Abrollhügel. Hierzu wurde zuerst die entsprechende Schalung aufgebaut, siehe Abbildung 2.5.17. Diese ist zu

einer Seite hin offen, denn dort wird später das bereits betonierte Bauteil aus Abbildung 2.5.16 platziert, siehe Abbildung 2.5.18.



**Abbildung 2.5.17**



**Abbildung 2.5.18**

Das vollständig bewehrte Bauteil ist Abbildung 2.5.19 zu entnehmen. Die Styrodurkörper mittig des Abrollhügels wurden entsprechend gekürzt und mittels Schalungsbretter voneinander getrennt. Nach der Betonage können die Bretter herausgeschlagen werden, was die schadensfreie Entfernung der Styrodurelemente ermöglicht. Somit können diese mehrfach wiederverwendet werden.



**Abbildung 2.5.19**

Im Folgenden soll noch auf zwei Details des Abrollhügels eingegangen werden. Zum einen ist die Anschlussbewehrung zwischen Nanodur-Verzahnung und Abrollhügel Abbildung 2.5.20 zu entnehmen und zum anderen sind die Stellen, an denen der Abrollhügel mit den Köchern verbunden wird, entsprechend mit drei Hüllrohren (für die horizontalen Gewindestangen) und einer Riffelung (Verguss) versehen worden. Damit soll ein guter Verbund zwischen den einzelnen Komponenten gewährleistet werden.



Abbildung 2.5.20

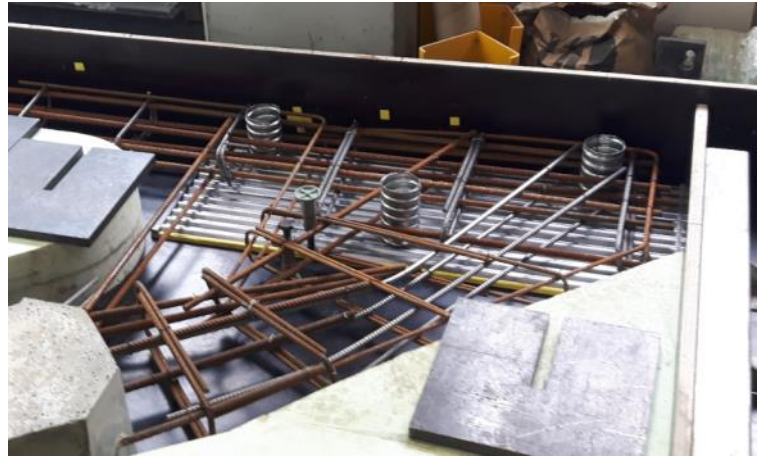


Abbildung 2.5.21

Das fertige Bauteil ist Abbildung 2.5.22 zu entnehmen.



Abbildung 2.5.22

### 5.3. Herstellung der Sichel

Insgesamt wurden vier Sichelbauteile für die Errichtung des Demonstrators benötigt. Diese sind vollständig mit Nanodur®-Beton gefertigt worden.

Die Schalung aus Abbildung 2.5.23 wurde mittels 3D-Heizdraht zugeschnitten. Sie besteht aus insgesamt zwölf Einzelteilen, welche zu einer Gesamtform zusammengesetzt wurden. Jedes der Styrodurelemente besitzt eine Stärke von 8,00 cm. Um auf eine benötigte Bauteilhöhe von  $h = 16,00$  cm zu kommen sind jeweils zwei identische Elemente mittels Styrodurkleber übereinander geklebt worden. Die seitlich auf der Schalung befindlichen Futterplatten dienen als Gewichte zur Beschwerung der Styrodurplatten. Dadurch soll bei der Betonage ein entweichen des Betons vermieden werden. Im nächsten Schritt erfolgten die Bewehrungsarbeiten.





**Abbildung 2.5.23**

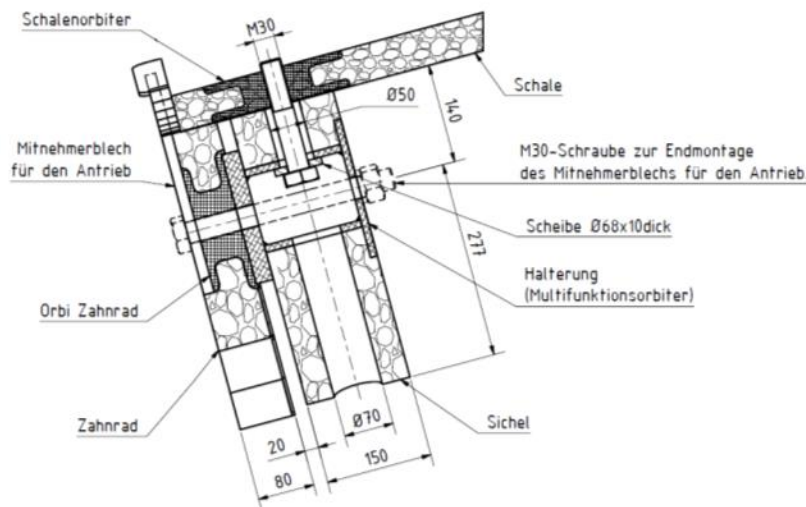
In Abbildung 2.5.24 ist die fertig eingeschaltete Sichel inklusive der erforderlichen Bewehrungsmenge zu sehen. Die Quergespannten Holzplatten dienen zur Befestigung der jeweiligen Transportanker sowie der mittig angebrachten Hüllrohre. Pro Sichel existieren zwei Hüllrohre mit einem Durchmesser von  $\varnothing = 32$  mm. Darüber hinaus sind in Abbildung 2.5.24 die sogenannte Multifunktionsorbiter zu erkennen. In jeder Sichel befinden sich zwei solcher Einbauteile. Diese sind von der Firma PFEIFER speziell für das ConSol-Projekt entwickelt und gefertigt worden.



**Abbildung 2.5.24**

Zur Lauffläche sowie zur Schale hin, besitzt der Orbiter zwei kreisrunde Öffnungen unterschiedlichen Durchmessers. Zur Sichel-seite hin ist eine Öffnung mit dem Durchmesser  $\varnothing = 50,00$  mm vorhanden. Die andere Öffnung besitzt einen Durchmesser  $\varnothing = 70,00$  mm. An beiden Öffnungen werden entsprechende Hüllrohre befestigt. Letztendlich kann später entlang der Hüllrohre eine Gewindestange geführt und mit der Schale verschraubt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 2.5.25 dargestellt. Die zweite Funktion des Orbiters besteht darin eine Verschraubung mit dem seitlich anliegenden Zahnrad herzustellen. Zuerst wird die Sichel mit der Schale verbunden und anschließend kann die Sichel-Zahnrad-Verschraubung angebracht werden. Anschließend können die Hüllrohre vergossen werden, so können gerade entlang der Lauffläche der Sichel Spannungsspitzen an den Hüllrohrenden vermieden werden. Zwischen Sichel und Zahnrad befindet sich ein 20 mm starker Spalt. Dieser wird

durch die Orbitergeometrie hergestellt. Durch die Fuge wird verhindert, dass sich die obere Verzahnung mit unteren Lauffläche verklemmt.



**Abbildung 2.5.25 (Quelle: PFEIFER, A. Natterer)**

Abbildung 2.5.26 zeigt einen solchen Orbiter, wie er in der Schalung verbaut ist. Über die Achse a kann eine Verbindung zum Zahnrad hergestellt werden. Eine Verbindung zur Sichel wird über die Achse b erzielt. Der Orbiter ist mit „Hutbügeln“ bewehrt (siehe Abbildung 2.5.28) und über eine Innensechskantschraube an der Schalung befestigt, so dass sich während der Betonage keine Verschiebungen ergeben können.



**Abbildung 2.5.26**

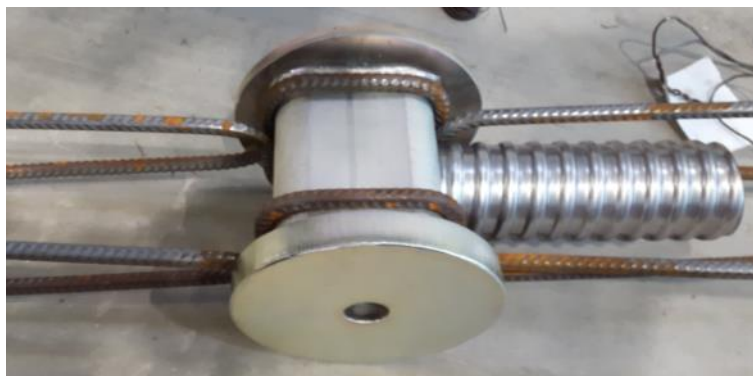
Entlang der Symmetrieachse des Bauteils ist ein Rd 42 Wellenanker kurze Form der Firma PFEIFER angebracht (Abbildung 2.5.27). Nach Verschraubung der Sichel mit der Schale kann so die Rinne samt Sichel angehoben werden. Das Gewinde des Transportankers ist mit Styrodur ausgefüllt, durch das eine kleinere Schraube gedreht ist. Diese Schraube wird durch eine Öffnung des seitlichen Schalungsbleches in der Styrodurschalung verschraubt. Das Ende des Wellenankers wird mit Draht an der Bewehrung hochgehängt.





**Abbildung 2.5.27**

Die Orbiter selbst erhalten eine spezielle Bewehrung aus „Hutbügeln“, die entsprechend der Form des Orbiters gebogen sind. Jeder Orbiter wird mit vier solcher Hutbügeln bewehrt. Somit wird ein vollständiger Verbund des Orbiters mit dem Beton sichergestellt.



**Abbildung 2.5.28**

In Abbildung 2.5.29 ist die Schalung mit der vollständig betonierten Sichel zu sehen. Erkennbar sind die beiden Orbiter sowie zwei herausstehende Hüllrohre, welche für die Antriebsmontage benötigt werden. Abbildung 2.5.30 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die vollständig ausgeschaltete Sichel.



**Abbildung 2.5.29**



Abbildung 2.5.30

## 5.4. Herstellung der oberen Verzahnung

Die Schalung für die obere Verzahnung ist in Abbildung 2.5.31 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Sie ist aus Styrodurelementen aufgebaut, welche mittels Wasserstrahlschneidegerät zugeschnitten wurden.

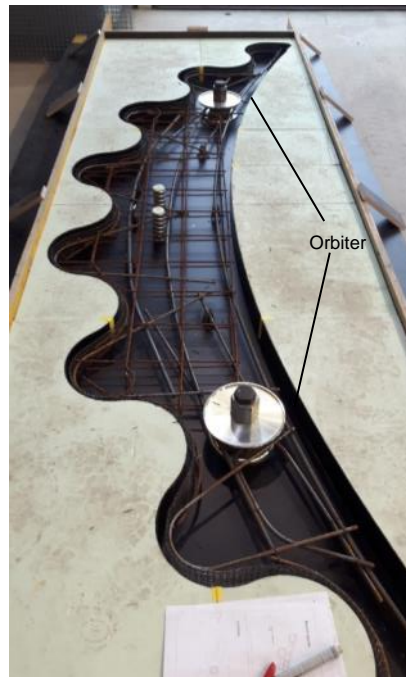


Abbildung 2.5.31

Die Elemente weisen eine Dicke von  $t = 8,00 \text{ mm}$  auf und wurden einlagig eingebaut. Die Schalung dient zur Fertigung von vier Verzahnungen und muss deshalb mehrere Ausschalvorgänge schadlos überstehen. Hierzu wurde die Betonzugewandte Styrodurseite mit einer 2 mm starken Gummierung versehen. Zusätzlich sind pro Verzahnung zwei Orbiter der Firma PFEIFER in die Schalung angebracht worden. Zwei M30 Schrauben verhindern eine Lageverschiebung der Orbiter. Die Funktion dieser Bauteile wird in Abbildung 2.5.25 deutlich. Die sogenannten Orbis dienen zur Verschraubung der Verzahnung mit der Sichel. In Abbildung 2.5.31 ist auf der Orbiteroberseite eine runde Aufkantung zu erkennen. Die, dadurch entstandene Vertiefung passt genau auf die Orbiter der Sichel. Die Aufkantung verhindert eine Verschiebung der beiden Bauteile zueinander und überträgt die auftretenden Vertikalkräfte. Über Gewindestangen können dann beide Betonteile miteinander verbunden werden. Mittig der Sichel sind zusätzlich zwei Hüllrohre (Durchmesser:  $\varnothing = 30 \text{ mm}$ ) angebracht, welche ebenfalls zur Verschraubung mit der Sichel dienen. Die vollständig ausgeschaltete Verzahnung kann Abbildung 2.5.32 entnommen werden. Insgesamt wurden vier Verzahnungen hergestellt, wobei sich immer jeweils zwei Bauteile voneinander unterscheiden.

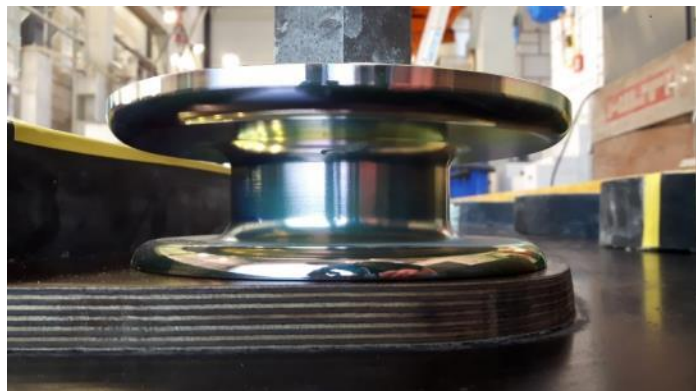


**Abbildung 2.5.32**

Zwei Verzahnungsbauteile verfügen über eine größere Aussparung, für diese ist ein 18 mm starkes Holzbrett in die Schalung eingelegt worden, siehe Abbildung 2.5.33. Auf dieses Schalungsbrett wurden dann pro Verzahnung zwei verkürzte Orbiter positioniert, siehe Abbildung 2.5.34. Diese Orbiter unterscheiden sich lediglich in ihrer Höhe von den beiden anderen Orbis des Zahnrades. Alle vier Bauteile besitzen somit eine konstante Breite von 8,00 cm. Die Aussparung dient zur Montage des Antriebs. Hier wird ein Blech montiert, dass mit dem Antriebssystem verbunden ist und somit das Abrollen der beiden Schalen entlang der Abrollhügel ermöglicht, siehe hierzu Kapitel 9.



**Abbildung 2.5.33**



**Abbildung 2.5.34**

Die entstandene Aussparung ist Abbildung 2.5.35 zu entnehmen. Zusätzlich sind alle Verzahnungen des Demonstrators gefast worden, um Kantenabplatzungen zu verhindern, siehe Abbildung 2.5.36.



Abbildung 2.5.35



Abbildung 2.5.36

## 5.5. Herstellung von Sichel und oberer Verzahnung

Abbildung 2.5.25 (Quelle: PFEIFER, A. Natterer) schematisch den vollständigen Montageaufbau der Sichel Zahnrad Verbindung. Über die beiden Orbiter sowie den mittig angebrachten Hüllrohren, können die beiden Bauteile miteinander verschraubt werden, siehe Abbildung 2.5.37.



Abbildung 2.5.37

## 5.6. Herstellung Antriebsbock

Für die Herstellung des Antriebsbocks wurde auf eine konventionelle Holzschalung zurückgegriffen. Hier wurden nur zwei kleinere Aussparungen mittels Styrodurelementen hergestellt, siehe Abbildung 2.5.38. Die Aussparungen dienen der Materialoptimierung. Da das Bauteil mit dem Köcher des Randaufagers verbunden werden soll, sind die beiden Auflagerbereiche mittels Riffelung und jeweils zwei Hüllrohren pro Seite versehen worden. Die Hüllrohre dienen einer nachträglichen Verschrauben des Köchers mit dem Antriebbock. Die geriffelte Oberfläche verbessert den Verbund nach dem Verguss.





**Abbildung 2.5.38**

Die Schalung ist zusätzlich mit verschiedenen Rd16 Wellenankern der Firma PFEIFER versehen worden. Diese haben neben der Transportankerfunktion ebenfalls die Aufgabe wichtige Antriebsteile am Bauteil befestigen zu können, beispielsweise Motorkomponenten.

Abbildung 2.5.39 zeigt nicht nur das fertige Bauteil, sondern auch die Montageposition des Motors.



**Abbildung 2.5.39**

Alle Bauteile sind mittels Spedition zur Firma Stanecker gefahren worden, da dort der Aufbau der Parabolrinne vollzogen wird. Insgesamt waren zwei LKW Transporte notwendig.

## 6. Auswahl bzw. Vergleich der im Markt verfügbaren Receiver hinsichtlich, Effizienz, Präzision, Kosten und Verfügbarkeit inklusive entsprechender Halterungen

Die verbauten Receiver in einem Parabolrinnenkraftwerk haben einen bedeutenden Einfluss auf die Energieausbeute aus der Sonne. Im Receiver wird die konzentrierte Solarstrahlung in Wärme umgewandelt und an das im Innern strömende Wärmeträgermedium übertragen. Das Stahlrohr besitzt eine optisch selektiv wirkende Beschichtung, die im Wellenlängenbereich des Solarspektrums möglichst hoch absorbierend, im Infrarot jedoch möglichst reflektierend wirkt, d. h. möglichst wenig emittiert. Heute werden Absorptionsraten von 96% und Emissionsraten von nur 9% erreicht. Um Wärmeverluste an die Umgebungsluft zu vermeiden, ist das Absorberrohr von einem evakuierten Glashüllrohr umgeben. Die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Glas und Metallrohr im Betrieb bei bis zu 500 °C wird durch Metallfaltenbälge an den Rohrenden ausgeglichen. Eisenarmes Glas und Anti-Reflexionsbeschichtungen stellen sicher, dass die konzentrierte Strahlung möglichst verlustfrei durch das Glasrohr auf die eigentliche Absorberschicht treten kann. Dabei werden Transmissionsgrade von 96% erreicht.

Im Folgenden werden verschiedenen Receiver Hersteller verglichen und nach dem Stand der Technik verglichen (Abbildung 2.6.1).

Kriterium	Rioglass Solar PTR70 DSG	Huiyin DSG (321 seamless)	Archimede HCESH-12 DSG
<b>Allgemein</b>	Rioglass Solar hat die Receiverproduktion von Schott Solar 2016 übernommen. Entwickler eines speziellen Borosilikat Glasses. Markteinführung der DSG Receiver in 2010 und der Öl-Receiver seit 2006	Die Huiyin Gruppe gilt als einer der erfahrensten Receiverherstellern. Seit den 1990er lieferte Huiyin Öl-Receiver für die Wartung von Kramer Junction in Kalifornien. Markteinführung der DSG Receiver in 2011	Erfahrener Produzierer von Receivern. Entwickler von Molten Salt-Receivern. Lieferung dieser Receiver für ein Projekt in 2010. Markteinführung von DSG-Receivern in 2009. Lieferung für ein Projekt in 2010. Nachträglich keine weiteren Projekte.
<b>Erfahrungen</b>	Solar Receiver Entwicklung seit 2002.	Solar Receiver Entwicklung seit 1980er	Solar Receiver Entwicklung seit 2006, prototype Produktion seit 2008. Solar Receiver development since 2006, prototype production since 2008
<b>Technisch</b>	Beschichtung auf 100% des Stahlrohres Absorbierung: $\alpha \geq 95\%$ , Emittanz: $\epsilon \leq 10\%$ Vaccuum kann nicht wiederhergestellt werden Moderne Anti-Reflektionsbeschichtung auf ca. 95% des Glasrohres. Transmission $\geq 94\%$ im beschichteten Bereich	Beschichtung auf ca. 99% des Stahlrohres Absorbierung: $\alpha = 96 \pm 1\%$ , Emittanz: $\epsilon = 10 \pm 1\%$ Vaccuum kann wiederhergestellt werden Neuste Hydropob-Anti-Reflektionsbeschichtung auf 100% des Glasrohres. Transmission = $97 \pm 1\%$ .	Beschichtung auf ca. 98% des Stahlrohres Absorbierung: $\alpha > 95,3\%$ , Emittanz: $\epsilon = 8,5\%$ Vaccuum kann nicht wiederhergestellt werden Neuste Hydropob-Anti-Reflektionsbeschichtung auf 100% des Glasrohres. Transmission $\geq 96,5\%$ im beschichteten Bereich
<b>Ursprungsland</b>	Geschäftssitz: Spanien Technologie: Germany Produktion: Spain	Geschäftssitz: China Technologie: Spanien und Israel Produktion: China mit belgischer Supervision	Geschäftssitz: Italien Technologie: Italien and Spanien Produktion: Italy
<b>Kosten</b>	700 €/Stk. Bestellmenge: 22.500 Stk.	450 €/Stk. Bestellmenge: 22.500 Stk.	900 €/Stk. Bestellmenge: 22.500 Stk.
<b>Gewährleistung</b>	Sehr limitiert Gewährleistung auf einige Monate nach Lieferung beschränkt. Nicht bis zum Zeitpunkt COD.	Umfassend und komplexes Gewährleistungsschema. Beinhaltet Receiver Performance und Vakuumverlust, gilt für mehrere Jahre und bezieht standardmäßige Degradation mit ein.	Sehr beschränkte Gewährleistung

Abbildung 2.6.1: Gegenüberstellung Receiver Hersteller

### Technischer Vergleich der Receiver zwischen Rioglass und Huiyin

#### 1. Beschichtungstechnologie

Bei einer Verwendung von Molybdän im Beschichtungsmaterial des Metallrohrs, kann es zu Spallationsschäden an der beschichteten Oberfläche kommen. Während der Verwendung

des Receivers kann zu einer Verringerung der Vakuumeffizienz kommen. Dies würde dazu führen, dass das Molybdän mit Sauerstoff reagiert und flüchtiges Oxid entsteht, das später an der inneren Oberfläche des Glasrohr kondensiert und wie eine Fluoreszenz erscheint, der sogenannte "Fluorescent Effect". Dies führt zu einer schlechteren Durchlässigkeit des Glasrohres zu dem inneren Metallrohr des Receivers und wird folglich die Receiver-Effizienz reduzieren und könnte auch zur Beschädigung des Receivers führen. Basierend auf vielen Forschungsarbeiten zu diesem Thema ist dieses Phänomen bereits in vielen Kraftwerken aufgetreten.

Rioglass: Verwenden Sie eine Beschichtungstechnologie, die Molybdän enthält.

Huiyin: Verwenden Sie eine Beschichtungstechnologie, die kein Molybdän enthält.

## **2. Absorption und Emission**

Allgemeinen: Sobald Wärmestrahlung auf einen Stoff trifft, wird die Strahlung absorbiert und gleichzeitig etwas Strahlung wieder freisetzen. Daraus folgt, dass ein geeignetes Material für Receiver einen hohen Absorptionsgrad und eine geringe Emission aufweisen sollte.

Rioglass: PTR70-DSG hat eine Absorption von  $\geq 95\%$  und eine Emission von  $< 10\%$ .

Huiyin: In Bezug auf das Datenblatt des Huiyin Standard Receivers hat dieser eine Absorption von  $> 96\% \pm 1\%$  und eine Emission von  $< 10\% \pm 1\%$ .

Die Werte des Huiyin Receiver wurden beim DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) in einem Alterungstest "Altern von selektiven Oberflächen" (1000 Stunden) untersucht. Es wurde festgestellt, dass der Absorptionsgrad bei 97-98% und die Emission bei 8,6% lag.

Bemerkung: Rioglass wurde bei 380 °C und Huiyin bei 450 °C getestet.

## **3. Wärmeverlust**

Rioglass: Information vom DLR, Wärmeverlust im Bereich von 60-80 W/m.

Huiyin: Information vom DLR, Wärmeverlust im Bereich von 70-90 W/m.

## **4. Vakuum**

Ein Vakuum zwischen Metallrohr und Glasrohr hat den Effekt, dass der Wärmeverlust von innen nach außen deutlich reduziert wird. Ein guter Receiver sollte somit immer einen guten Vakuumzustand aufweisen. Bei einer Verschlechterung des Vakuums durch Diffusion von Wasserstoff in den Hohlraum kommt zu einer Erhöhung der Wärmeverluste in dem Bereich zum Glasrohr. Aus diesem Grund sollte das Vakuum reformierbar sein, sobald sich der Zustand signifikant verschlechtert.

Rioglass : Nicht reformierbares Vakuum

Huiyin: Reformierbares Vakuum

## **5. Transmission des Glasrohres**

Die Glasrohre der Receiver sollten eine möglichst hohe Durchlässigkeit aufweisen, damit die Sonnenstrahlung mit geringsten Verlusten auf die Metallrohre auftreffen kann.

Rioglass: Transmission  $\geq 94\%$

Huiyin: Transmission  $97\% \pm 1$ .

## **6. Gesamteffizienz**

Nach dem Test der beiden Receiver hat Huiyin eine geringere Gesamteffizienz als Rioglass von etwa 1%, weniger jedoch als 2%.

### **Bewertung**

Unter Berücksichtigung des technischen Vergleichs haben die Receiver beider Unternehmen in verschiedenen Aspekten bessere und schlechtere Eigenschaften. Wenn die Einbauzeit berücksichtigt wird, hat der Receiver von Rioglass eine etwas höhere Effizienz. Aber wenn man den langfristigen Betrieb in Betracht zieht, scheint der Receiver von Huiyin bessere Eigenschaften zu haben. Der technische Vergleich muss jedoch im Detail mit mehr Parametern durchgeführt werden. In diesem Fall wurden nur Hauptparameter basierend auf den vorhandenen Daten verglichen.

### **Halterung**

Die Halterungen wurden in diesem Arbeitspaket unter Punkt 4 beschrieben.

## **7. Herstellung der Antriebsregelung, Algorithmen und Sensorik für Sonnenstandsnachführung**

Bisher werden die Parabolrinnen mit Hydrauliksystemen angetrieben. Die Parabolrinnen werden aus leichten Materialien (z.B. GFK mit Stahlrahmen) gefertigt. Bei dem Projekt Con-Sol wird untersucht, ob solarthermische Parabolrinnen aus Beton wettbewerbsfähig zu Stahl- oder GFK-Konstruktionen gefertigt werden können. Der Antrieb für die Betonkollektoren wird mechanisch über Kettenantrieb erfolgen.

Die Betonkollektoren werden aufgrund des höheren Gewichtes nicht aufgehängt und über Hydrauliksystem bewegt, sondern auf einem speziell gefertigten Lager abgerollt. Der Antrieb erfolgt über sechs Motoren. Die Motoren sind entlang der Betonrinne auf Bodenfundamenten montiert und über die gesamte Länge der Betonrinne mit einer torsionssteifen Welle verbunden. Die Kraftübertragung von den Motoren auf die Welle erfolgt über Ritzel und Ketten. Von der Welle erfolgt die Kraftübertragung ebenfalls über Ritzel und Ketten auf einen Linearantrieb. Der Linearantrieb bewegt eine Mitnehmerbuchse, mit der die Betonschalen über ca. 5m Fahrweg horizontal auf dem Lager der Rinne bewegt wird. Die Elektrotriebmotoren einen Frequenzumrichter Drehzahl- und Drehrichtungsgeregelt, sodass die Rinne exakt positioniert werden kann.

Die Anforderung an die Steuerung für diese Antriebsart und der Kollektorenkonstruktion eine zuverlässigen Regelung der Temperatur zu gewährleisten ist allerdings grundsätzlich vergleichbar mit dem Betrieb eines Kollektors mit Hydraulikantrieb. Die Steuerung muss den



aktuellen Stand der Sonne über der Solarrinne berechnen und die Rinne fokussieren, sodass möglichst viel Energie der direkten Sonneneinstrahlung auf die Receiverrohre projiziert werden kann. Parallel muss die Temperatur des Wärmeüberträgermediums in den Receiver-Rohren überwacht werden, um die Anlage vor Überhitzung zu schützen. Die Logik für diese Aufgaben wird unverändert von der Steuerung der hydraulikangetriebenen Rinne übernommen. Die Positionierung und das Nachführen des Kollektors zur Sonnenbewegung erfolgt über die Drehzahl der Motoren.

Die Kollektorposition wird mit einer Siemens S7-1200 Steuerung berechnet und geregelt. Der Zugriff auf die Steuerung kann über einen Web-Browser oder einem Bedienpanel über Ethernet erfolgen.

Die Motoren werden mit einem Frequenzumformer gesteuert, um den Kollektor exakt auf die notwendigen Positionen zu fahren. Die Segmente werden mit Magnetbremsen am Motor in einer sicheren Position gehalten, wenn die Motoren abgeschaltet werden und bei Stromausfall. Die Segmente werden verdrehungssteif gefertigt und die sechs Motoren sind über eine verwindungssteife Welle an die Segmente gekoppelt, sodass die sechs Motoren synchron bewegt werden müssen. Die Anzahl der Motoren ist als  $n+1$  gewählt, sodass der Kollektor noch kontrolliert bewegt werden kann, wenn ein Motor ausfällt. Der aktuelle Stand des Kollektors wird über zwei Winkelmesser am Anfang und Ende des Kollektors gemessen. Mit den zwei Winkelmessern kann überwacht werden, ob eine ungewollte Verwindung des Kollektors stattfindet. Gerade bei dem Einsatz von Thermoöl ist eine Überwachung der Verwindungssteife notwendig, weil das Umweltschaden bei einer Verwindung und einem Bruch der Receiverrohre erhebliche Auswirkungen haben kann.

Zusätzliche Messtechnik ist eine Temperaturmessungen am Kollektorausgang und eine Volumenstrommessung am Thermalöleingang. Bei größeren Anlagen wird nur eine Volumenstrommessung am Eingang des Kollektorloops benötigt. Ein Kollektorloop kann aus mehreren in Reihe geschalteten Kollektoren bestehen.

Die Kollektorsteuerung, bzw. die Ansteuerung der Motoren kann mit einem Frequenzumformer für alle sechs Motoren oder mit jeweils einem Frequenzumformer pro Motor realisiert werden. Beide Varianten werden im Folgenden betrachtet.

### **1. Antrieb der Motoren mit einem Frequenzumformer**

Bei einer Steuerung der Antriebe mit nur einem Frequenzumformer für alle Motoren müssen die Motoren separat überwacht werden und ggf. abschaltbar sein. Zur Überwachung der Motoren werden jeweils die Temperatur und die Stromaufnahme von jedem Motor gemessen und in der Steuerung überwacht. Sollte die Temperatur oder die Stromaufnahme eines Motors zu hoch werden, wird dieser Motor abgeschaltet. Damit dieser Motor den Kollektor nach Abschaltung nicht blockiert, muss die Magnetbremse mit einem Relais gelöst werden. Für diese Konstellation sind die

Folgenden Schaltanlagenkomponenten notwendig.

**Tabelle 2 Stückliste Schaltanlage für ein Frequenzumformer**

Pos.	Anzahl	ME	Bezeichnung & Informationen	Hersteller	Einzelpreis	Gesamtpreis
1	1	Stück	Schaltschrank lackiert 500 x 500 x 300	Rittal	155,00 €	155,00 €
2	1	Stück	Hauptschalter 16A	Eaton	32,00 €	32,00 €
3	1	Stück	Leitungsschutzschalter 3polig 10 A	Siemens	25,00 €	25,00 €
4	1	Stück	Leitungsschutzschalter 1polig 2 A	Siemens	10,00 €	10,00 €
5	1	Stück	Tragschiene gelocht Phoenix Contact Inhalt: 10 St.	Phoenix	5,00 €	5,00 €
6	60	Stück	Zugfeder-Durchgangsklemme ST 2,5 Grau	Phoenix	1,00 €	60,00 €
7	14	Stück	Zugfeder-Schutzleiterklemme ST 2,5-PE Grün-Gelb	Phoenix	1,00 €	14,00 €
8	26	Stück	Kabelverschraubung M16 mit Gegenmutter	LappKabel	1,40 €	36,40 €
9	6	Stück	Schütz 3 polig 3 kW zum Schalten der einzelnen Motoren	Siemens	35,00 €	210,00 €
10	6	Stück	Relais 24V zum Schalten der Magnetbremsen der Motoren	Finder	19,00 €	114,00 €
11	6	Stück	Thermistor-Motorschutzrelais	Siemens	62,00 €	372,00 €
12	6	Stück	Wirkleistungs-Messumformer 3-phasig	Adamczewski	290,00 €	1.740,00 €
13	1	Stück	Frequenzumformer VLT® HVAC Drive FC 102 IP55 Profinet	Danfoss	600,00 €	600,00 €
14	1	Stück	SIMATIC S7-1200, CPU 1215C 14 DI 24VDC; 10 DO 24VDC	Siemens	506,00 €	506,00 €
15	1	Stück	SIMATIC S7-1200 POWER MODUL PM1207	Siemens	69,00 €	69,00 €
16	1	Stück	SIMATIC S7-1200, Analogeingabe, SM 1231, 4 AI	Siemens	199,00 €	199,00 €
17	1	Stück	SIMATIC S7-1200, Analogeingabe, SM 1231, 8 AI	Siemens	324,00 €	324,00 €
18	1	Stück	SIMATIC S7-1200, Digitalausgabe SM 1222, 8 DO	Siemens	97,00 €	97,00 €
19	1	Stück	OBO Bettermann Kabelkanal Verdrahtungskanal 40 x 40, 2 m Grau	Bettermann	8,00 €	8,00 €
20	1	Pack	H05V-K Einzelader 1 x 1 mm² Blau 100 m	LappKabel	10,00 €	10,00 €
21	10	Meter	X05V-K Einzelader 1 mm² Blau, Weiß	LappKabel	1,00 €	10,00 €
22	10	Meter	Einzelader schwarz 1,5mm²	LappKabel	1,00 €	10,00 €
23	10	Meter	Einzelader weiss 0,75 mm²	LappKabel	1,00 €	10,00 €
24	1	Satz	Kleinmaterial		50,00 €	50,00 €
25	1	Satz	Schaltschrankmontage	Ing-Buse	480,00 €	480,00 €
26	1	Satz	Programmierarbeiten	Ing-Buse	1.980,00 €	1.980,00 €
27	1	Satz	Inbetriebnahme	Ing-Buse	850,00 €	850,00 €
			<b>Gesamtsumme</b>			<b>7.976,40 €</b>

## **2. Antrieb der Motoren mit sechs Frequenzumformern**

Alternativ können die Motoren mit einem Frequenzumformer pro Motor angesteuert werden. Bei dieser Variante erfolgt die Auswertung der Motorströme und Temperaturen in dem Frequenzumformer. Die Frequenzumformer sind über Ethernet mit der Steuerung verbunden, sodass der aktuelle Zustand der Motoren in der Steuerung überwacht werden kann. Sollte ein Motor ausfallen, muss die Bremse von dem Motor separat über ein Relais gelöst werden. Für diese Konstellation sind die

Folgenden Schaltanlagenkomponenten notwendig.

**Tabelle 3 Stückliste Schaltanlage für sechs Frequenzumformer**

Pos.	Anzahl	ME	Bezeichnung & Informationen	Hersteller	Einzelpreis	Gesamtpreis
1	1	Stück	Schaltschrank lackiert 500 x 500 x 300	Rittal	155,00 €	155,00 €
2	1	Stück	Hauptschalter 16A	Eaton	32,00 €	32,00 €
3	1	Stück	Leitungsschutzschalter 3polig 10 A	Siemens	25,00 €	25,00 €
4	1	Stück	Leitungsschutzschalter 1polig 2 A	Siemens	10,00 €	10,00 €
5	1	Stück	Tragschiene gelocht Phoenix Contact Inhalt: 10 St.	Phoenix	5,00 €	5,00 €
6	30	Stück	Zugfeder-Durchgangsklemme ST 2,5 Grau	Phoenix	1,00 €	30,00 €
7	8	Stück	Zugfeder-Schutzleiterklemme ST 2,5-PE Grün-Gelb	Phoenix	1,00 €	8,00 €
8	20	Stück	Kabelverschraubung M16 mit Gegenmutter	LappKabel	1,40 €	28,00 €
9	0	Stück	Schütz 3 polig 3 kW zum Schalten der einzelnen Motoren	Siemens	35,00 €	0,00 €
10	6	Stück	Relais 24V zum Schalten der Magnetbremsen der Motoren	Finder	19,00 €	114,00 €
11	0	Stück	Thermistor-Motorschutzrelais	Siemens	62,00 €	0,00 €
12	0	Stück	Wirkleistungs-Messumformer 3-phasig	Adamczewski	290,00 €	0,00 €
13	6	Stück	Frequenzumformer VLT® HVAC Drive FC 102 IP55 Profinet	Danfoss	600,00 €	3.600,00 €
14	1	Stück	SIMATIC S7-1200, CPU 1215C 14 DI 24VDC; 10 DO 24VDC	Siemens	506,00 €	506,00 €
15	1	Stück	SIMATIC S7-1200 POWER MODUL PM1207	Siemens	69,00 €	69,00 €
16	1	Stück	SIMATIC S7-1200, Analogeingabe, SM 1231, 4 AI	Siemens	199,00 €	199,00 €
17	0	Stück	SIMATIC S7-1200, Analogeingabe, SM 1231, 8 AI,	Siemens	324,00 €	0,00 €
18	0	Stück	SIMATIC S7-1200, Digitalausgabe SM 1222, 8 DO	Siemens	97,00 €	0,00 €
19	1	Stück	OBO Bettermann Kabelkanal Verdrahtungskanal 40 x 40, 2 m Grau	Bettermann	8,00 €	8,00 €
20	1	Pack	H05V-K Einzelader 1 x 1 mm² Blau 100 m	LappKabel	10,00 €	10,00 €
21	10	Meter	X05V-K Einzelader 1 mm² Blau, Weiß	LappKabel	1,00 €	10,00 €
22	10	Meter	Einzelader schwarz 1,5mm²	LappKabel	1,00 €	10,00 €
23	10	Meter	Einzelader weiss 0,75 mm²	LappKabel	1,00 €	10,00 €
24	1	Satz	Kleinmaterial		50,00 €	50,00 €
25	1	Satz	Schaltschrankmontage	Ing-Buse	350,00 €	350,00 €
26	1	Satz	Programmierarbeiten	Ing-Buse	1.280,00 €	1.280,00 €
27	1	Satz	Inbetriebnahme	Ing-Buse	850,00 €	850,00 €
			<b>Gesamtsumme</b>			<b>7.359,00 €</b>

### 3. Zusammenfassung Antriebssteuerungskonzept

Das Material für die Ansteuerung der Motoren mit einem Frequenzumformer für alle Motoren ist etwas günstiger, aber der Schaltschrankbau und der Programmieraufwand ist wiederum etwas höher, sodass beide Varianten als nahezu Preisneutral anzusehen sind. Bei der Variante mit sechs Frequenzumformern ist die Verfügbarkeit bei einem Frequenzumformerausfall deutlich höher. Mit den zwei installierten Winkelmessern kann erkannt werden, wenn sich der Kollektor verwinden sollte. Bei einem Antrieb der Motoren mit sechs Frequenzumformern kann eine ungewollte Verwindung des Kollektors über die entsprechende Ansteuerung der einzelnen Motoren korrigiert werden. Die Frequenzumformer sind für die Installation außerhalb des Schaltschranks geeignet und arbeiten bei Umgebungstemperaturen von bis zu 50°C. Der Schaltschrank für die Variante mit sechs Frequenzumformern kann somit kleiner gestaltet werden, als bei der Variante mit nur einem Frequenzumformer, weil die Messumformer für Temperatur und Stromaufnahme der Motoren nicht benötigt werden.

Der Kollektorantrieb mit sechs Motoren mit jeweils einem Frequenzumformer hat deutliche Vorteile und macht den Antrieb betriebssicher. Damit wird diese Variante für diese Anwendung ausgewählt.

## 8. Entwicklung eines Wartungskonzeptes aus Sicht des Solarfeldbetreibers

Betrieb und Wartung spielen eine wesentliche Rolle für die Leistung ein solarkonzentrierendes System und letztendlich für den jährlichen Ertrag. Die Aufstellung eines geeigneten Betriebs- und Wartungsplans ist unbedingt erforderlich, um sicherzustellen, dass die Anlage in ihrer vorgesehenen Kapazität arbeitet und die garantierte Leistung erbringt. Kleinere Probleme wie Verschmutzung, Undichtigkeiten, Isolierung, Versagen von mechanischen und elektrischen Komponenten usw. ... scheinen im Einzelfall nicht kritisch zu sein. Die Kombination dieser Fehler kann jedoch zu einer erheblichen Leistungsreduzierung führen und zu einer Unterschreitung der garantierten Leistung führen, die letztendlich den Erfolg oder Misserfolg des Projekts bestimmen kann.

Basierend auf der Art und dem Ziel der Wartung kann es in die folgenden drei Arten eingeteilt werden:

- Vorhersagende Wartung: Dies ist mit der Überwachung verschiedener Parameter des Solarfeldes verbunden. Es werden Fehlerarten identifiziert und Referenzen erstellt, um festzustellen, wann eine Komponente in die Nähe einer Fehlfunktion kommt. Wenn einige der charakteristischen Parameter eines Geräts normale Betriebsbereiche überschreiten, kann davon ausgegangen werden, dass diese Komponente fehleranfällig ist und infolgedessen durch eine neue Komponente ersetzt werden muss. Mit dieser Maßnahme werden Fehler vermieden, bevor sie überhaupt auftreten, wodurch die Verfügbarkeit, die Ausbeute und die Leistung der Anlage maximiert werden kann, da keine unnötigen Stillstände erforderlich sind.
- Vorbeugende Wartung: Obwohl dies der vorausschauenden Wartung ähnelt, ist dies etwas anders, da es keine kontinuierliche Überwachung verschiedener Parameter gibt. Die Lebensdauer verschiedener Komponenten wird nach früheren Tests des Herstellers oder nach früheren Erfahrungen in ähnlichen Anwendungen geschätzt. Daher basiert die vorbeugende Wartung auf Erfahrung und erfordert systematische und regelmäßige Inspektion und Austausch von Komponenten.
- Korrektive Wartung: Sie beziehen sich auf den Austausch einer beschädigten/degradierten Komponente, sobald ein Fehler/Verschlechterung auftritt. Dies ist die Standardprozedur, die nicht auf die vorhersagende oder vorbeugende Wartung durchgeführt werden muss. Dies führt jedoch in den meisten Fällen zu einem Stillstand der Anlage.

Der Solarfeldbetreiber strebt in jedem Fall eine der ersten beiden Wartungsstrategien an, weil so ein Produktionsstopp des Kraftwerkes vermieden werden kann. Im Folgenden werden die wichtigsten Tätigkeiten zu einer Sicherstellung des Betriebes beschrieben. Sie werden in den Intervallen täglich, wöchentlich, monatlich, vierteljährlich und jährlich aufgeführt.

### 1. Tägliche Aktivitäten:

- Qualität des Speisewassers: Prüfen, ob die Qualität des Speisewassers, das dem Solarfeld zur Verfügung gestellt wird, der benötigten Qualität entspricht (automatisch von der Steuerung während des Betriebs kontinuierlich überprüft)

- Sichtprüfung des Solarfeldes zur Überprüfung von Anomalien oder Hindernissen (z.B. Blockierung der Kollektorbewegung)
- Inspektion der Bewegung des Kollektors - sowohl durch Sichtkontrolle für kurze Zeit als auch kontinuierlich durch das Kontrollsystem
- Sichtprüfung der mechanischen Anlagenperipherie (Pumpen, Behälter) zur Überprüfung auf Anomalien (Leckagen, etc.)
- Auf Lecks an wichtigen Steuerventilen prüfen
- Prüfen und reinigen des Solarsensor in der Wetterstation
- Überprüfung auf Anomalien, Warnsignale, unerwartete Prozessparameter während der Inbetriebnahme, des Betriebs und der Stilllegung der Anlage (automatisch von der Steuerung während dieser Zeiträume überprüft)

## **2. Wöchentliche Aktivitäten:**

### *Reinigung der Spiegel und Receiver*

- Regelmäßiges Waschen von Spiegeln und Receiverrohren, wenn die Anlage nicht in Betrieb ist (vor der Inbetriebnahme, nach dem Herunterfahren oder während einer niedrigen DNI-Periode usw.)

### *Dampfabscheider und andere Behälter*

- Sichtprüfung des Wasserstand-Seitenglases zur Überprüfung der Remote-Messung.
- Sichtprüfung der Druckanzeige des Abscheiders und auf Leckage.
- Ableitung von starkem Schlamm und Schmutz innerhalb der Behälter (die Zeit für den Abfluss hängt von der Wasseranalyse ab).
- Daten aufzeichnen, siehe Kontrollblatt.

### *Leckagen im Solarfeld*

- *Looking for stagnant fluid on the ground or on any parts especially flexible connections, vessels and major valves*
- Sichtprüfung, ob sich Flüssigkeiten auf dem Boden oder an irgendwelchen Teilen besonders der REPA, Gefäßen und großen Ventilen angesammelt hat.

### *Antrieb*

- Prüfung auf Beschädigung der Kabelmäntel durch Alterung oder mechanischen Beschädigungen
- Kontrolle der Schraubverbindungen auf Festigkeit mechanischen Beschädigungen

### *Ventile*

- Überprüfung der äußeren Rohrleitungen auf Beschädigungen
- Schraubverbindungen prüfen
- Druckentnahme- und Steuerleitungen reinigen
- Überprüfung die Anbaugeräte auf Beschädigungen
- Reinigung der Filter

### *Wetterstation*

- Überprüfung der Wetterstation auf offensichtliche Ausfälle oder Beschädigungen der Ausrüstung: Windmast, Sonnensensor, Schaltkasten, etc.
- Beschädigungen des Zauns und der Vorhängeschlösser prüfen.
- Überprüfung der Position und Ausrichtung des Solarsensors, beobachten des Tracking-Verhalten für einige Minuten
- Überprüfung der Abspannseile des Windmastes auf festen Sitz.

### **3. Monatliche Aktivitäten:**

*Zusätzlich zu früheren täglichen und wöchentlichen Aufgaben werden die folgenden Aktivitäten auf monatlicher Ebene ausgeführt.*

### *Receiver holder*

- Inspektion auf starke Biegung oder ungewöhnliche Positionen
- Status aller Schrauben prüfen auf starke Biegeschäden oder Risse durch
- Ein Abstand von 5 mm zwischen der Klemme des Receiverhalters und der metallischen Kante des Receivers muss beibehalten werden, um Kollisionen oder Beschädigungen zu vermeiden

### *Spiegelzustand*

- Auf gebrochene und/oder verstellte Spiegel
- Verschmutzungen prüfen
- Überprüfung auf Spiegelkorrosion

### *Stahlstruktur an Betonkörper und Antrieb*

- Inspektion auf allgemeine Rostschäden besonders an Kratzstellen.
- Lockerung oder Abweichung der Seitenplattenverbindung von der Segmentstirnkante.
- Dicker Schmutz führt zur Bildung von Feuchtigkeit und damit zur Beschädigung der Oberflächen.
- Defekte Schweißnähte
- Lose Verbindungen oder instabile Gegenstände, Profilen, lockern Muttern oder Schrauben usw.

### *Rohrleitungsisolierung*

- Auf erkennbaren Schäden an der Rohrleitungsisolierung prüfen

### **4. Vierteljährliche Aktivitäten:**

*Zusätzlich zu früheren täglichen, wöchentlichen und monatlichen Aufgaben werden die folgenden Aktivitäten vierteljährlich durchgeführt*

### *Kollektor- und Receiverausrichtung*

- Überprüfung, ob die Abrollgeometrie des Kollektors und die Receiver-Brennlinie einen Ausrichtungsfehler aufweisen

### *Receiverzustand*

- Überprüfung, ob Receiver ihre Evakuierung im inneren des Rohrs verloren haben
- Überprüfung auf beschädigte Glasrohre
- Überprüfung auf starke Kratzer auf den Glasrohren
- Alle Reflection-Shields müssen korrekt am Kopf des Receiverhalters befestigt sein
- Das Absorberrohr muss auf starke Verbiegung geprüft werden, diese Biegung ist ein Indikator für hohe Kräfte, die auf beide Enden des Receivers ausgeübt werden

### *REPA*

- Bei REPA-Schäden oder plötzlichen Leckagen sind die Maßnahmen stark von Fall zu Fall und von der Schadenslage abhängig. Zweimal im Jahr sollten die Stopfen von den Füllanschlüssen entfernt und mit einer Gleitmittelverbindung oder einem gleichwertigen Hochtemperaturschmiermittel geschmiert werden.
- Wenn ein drastischer Druckabfall vom Kontrollraum beobachtet wird, müssen die flexiblen Verbindungen beobachtet und gegebenenfalls untersucht werden.

### *Umwälzpumpe und andere Pumpen*

- Die Pumpe sollte immer ruhig und ohne Vibrationen laufen. Laute Geräusche oder Vibrationen weisen auf eine Fehlfunktion hin.
- Sicherstellen, dass die mit einem Temperaturfühler am Lagerdeckel auf der Motorseite gemessene Temperatur die in den technischen Daten angegebene Abschalttemperatur nicht überschreitet.

### *Bodenbewuchs*

- Überprüfen, ob Pflanzen aus dem Boden wachsen und die Parabolrinne bewuchern

### *SCADA und PLC System*

- Überprüfen, ob alles ordnungsgemäß funktioniert
- Überprüfen, ob die SPS in den empfohlenen Einstellungen arbeitet
- Extra Backup wird alle drei Monate auf einem externen Festplattensystem empfohlen

## **5. Jährliche Aktivitäten:**

*Zusätzlich zu früheren täglichen bis vierteljährlichen Aufgaben werden die folgenden Aktivitäten auf jährlicher Ebene durchgeführt.*

### *Scaling an der Innenseite des Receiverrohres*

- Ein Scaling und die Auswirkung auf die Systemleistung müssen visuell bestimmt werden.
- Diese Wartungsaufgabe wird in der Regel ausgelagert, da sie nur selten durchgeführt wird und "Entkalkungssysteme" und industrielle Entkalkungsmittel erfordert.

### *Fundamente*

- Überprüfen, ob die Oberfläche stark beschädigt ist
- Überprüfen, ob die Fundamente offensichtlich im Boden absinken

## Messinstrumente

- Temperaturumformer kalibrieren
- Druckmessumformer kalibrieren
- Durchflussmesser kalibrieren
- Kalibrierung andere Sensoren / Messgeräte

## Pumpen und Behälter

- Eine periodische Inspektion aller größeren Pumpen alle 6-9 Monate wird empfohlen, mindestens einmal pro Jahr
- Regelmäßige Inspektionen aller größeren Behälter alle 9-12 Monate wird empfohlen, mindestens einmal pro Jahr

Zusätzlich zu den oben genannten Aktivitäten gibt es mehrere Aktivitäten, die auf mehrjähriger Ebene durchgeführt werden müssen, wie z.B. die Kalibrierung von Wetterstationen, die Inspektion von Scaling in Rohren und Behältern usw.

## 9. Auslegung des elektrischen Antriebssystems

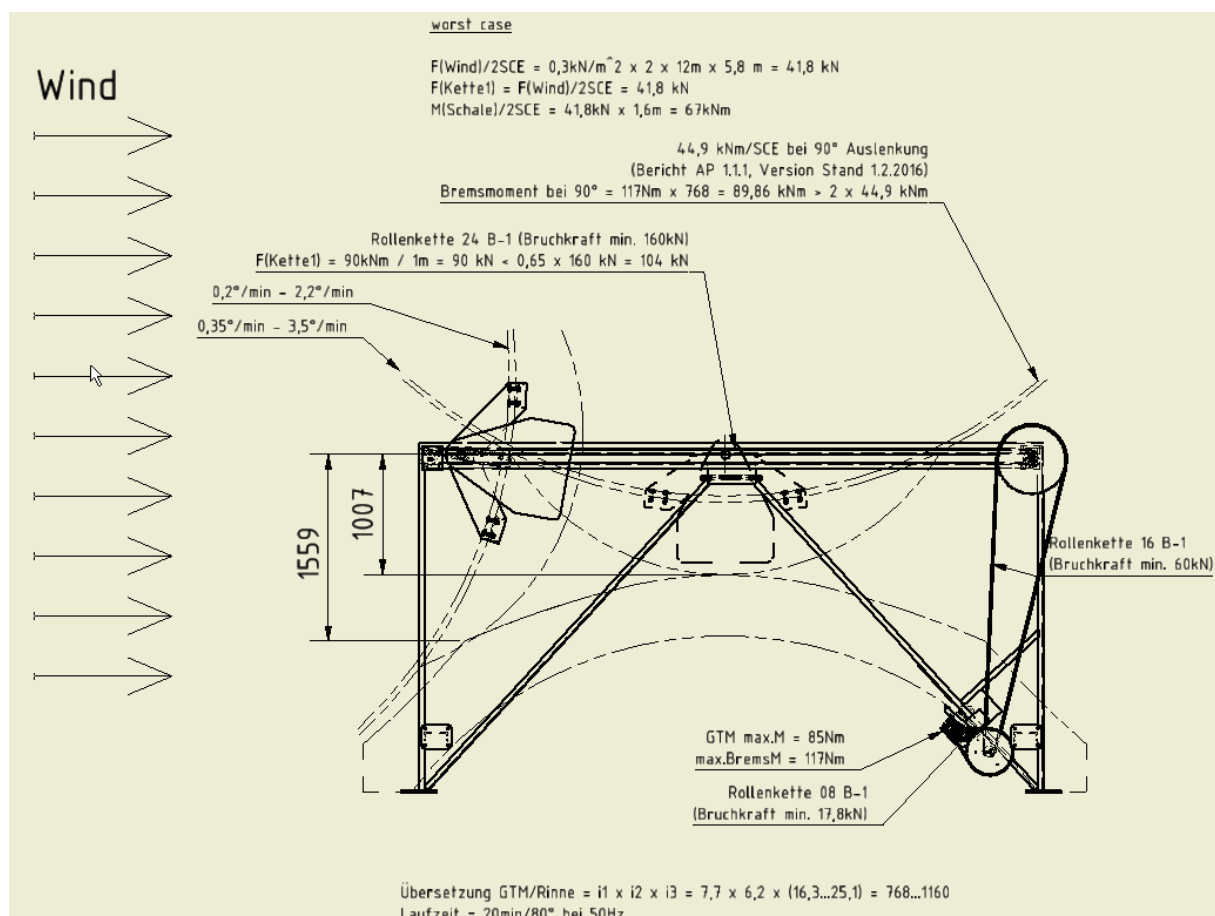


Abb 2.9.1 Systemdarstellung mit Windangriff



## Rechner Windlast Berechnung - Geschwindigkeitsdruck berechnen

Geschwindigkeitsdruck (Staudruck), Windlasten in unterschiedlichen Höhen.

### Winddaten

maximale Windgeschwindigkeit  
in 10m Höhe über ebenem  
Grund (max. 30 m/s)

 m/s

Windlast für Höhe (z.B.  
Dachhöhe, Gebäudehöhe)

 m

### Oberflächenparameter

Rauhigkeitslänge (0.0002 -  
1.6)\*

 m

mittlere  
Windgeschwindigkeit\*  
[m/s]

Geschwindigkeitsdruck\*  
[kPa] [kN/m²]

Geschwindigkeitsdruck\*  
[kg/m²]



\*Die Berechnung (Prandtl) erfolgt für eine Luftdichte von 1.25 kg/m³ bei 10°C. Die Windlast ergibt sich durch Multiplikation des Geschwindigkeitsdruckes mit dem aerodynamischen Kraftbeiwerten (<1). Dieser ist für Gebäude und freistehende Dächer und Formen (Neigungen) aus der DIN 1055 T4 zu entnehmen. Für die Umrechnung auf kg/m² wird eine Erdbeschleunigung von 9,81 m/s² (Wert für Europa (50° nördlicher Breite) 1kp ~ 1kg), berücksichtigt. Die Ergebnisse sind eine erste grobe Abschätzung. Ohne Gewähr. Haben Sie Fragen, dann senden Sie uns ein E-mail oder rufen Sie uns an.

### Betrieb / Windgeschwindigkeit 15m/s

M(Schale)/SCE = 16,9kNm (Bericht AP 1.1.1, Version Stand 1.2.2016/135°)

F(Kette1) = 2 x M(Schale)/SCE / 1,56m = 21,7 kN <<< 104kN

M(GTM) = 2 x M(Schale)/SCE / 1160 = 29Nm <<< 85Nm

### Alternativ 1GTM/SCA Windgeschwindigkeit 15m/s

max.Verdrehwinkel am Rohr (St, 100x2) = 8° (ohne Kupplung)

Schale in 10° Stellung = 0,06°

## **10. Konstruktion der mechanischen Schnittstelle zu den elektrischen Antriebe**

- Auflage der Lineareinheit auf den Betonsockel (mit Gewindehülsen) geschraubt/  
max. 90kN horizontal
- Mitnehmerblech an die Rinnen stirnseitig geschraubt
- Getriebemotor unten am Betonsockel geschraubt
- Torsionswellenlagerung unten am Betonsockel geschraubt
- Torsionswellenlagerung unten am Abrollsegment geschraubt

## **11. Entwicklung des Antriebssystems, bestehend aus Leistungselektronik, Motor, Getriebe, Bremse und Kuppelung, sowie Stellmitteln (Seil, Stangen, etc.)**

Durch die Kombination von bewährten mechanischen Komponenten und Mikroprozessor-elektronik wurde ein spezielles Antriebssystem entwickelt.

Der Dreiphasen-Asynchronmotor mit Käfigläufer ist eine wesentliche Komponente des Antriebs. Aufgrund des einfachen Aufbaus und der bekannten Robustheit und Zuverlässigkeit sind Asynchronmotoren seit Jahrzehnten in vielen Antriebsanwendungen weltweit erfolgreich im Einsatz. Durch die Verwendung von Frequenzumformern (1 FU/Motor) ist es möglich, das Drehmoment (Zugkraft) und die Stellzeit des Antriebs zu variieren.

Der Antrieb folgt kontinuierlich einem Sollwertsignal.

Die Antriebseinheiten sind je zwischen 2 SCEs auf Betonsockeln, die zwischen 2 Abrollhügeln integriert sind, montiert (Schraubverbindung) und ziehen die SCEs stirnseitig paarweise über die Abrollhügel. Die Antriebseinheiten sind über die gesamte Länge der SCA mit einer torsionssteifen Welle verbunden. Die Welle treibt über ein Ritzel (pro Antriebseinheit) eine umlaufende Rollenkette an. Diese Rollenkette wird von einem Elektrogetriebemotor (pro Antriebseinheit) über die Torsionswelle angetrieben und treibt (je Antriebseinheit) das große Kettenrad (Abbildung) des Linearmoduls an. Dieses treibt das Antriebsritzel der umlaufenden Kette des Linearmoduls an. In den Kettenstrang des Linearmoduls ist die längeneinstellbare Mitnehmerbuchse (Abbildung) integriert. Die Mitnehmerbuchse zieht (Nennzugkraft = 20kN) somit die Betonschalen über den Verbindungsbolzen der Beschläge über ca. 4,4 m Fahrweg horizontal. Die Elektrogetriebemotoren werden parallel über einen Frequenzumrichter pro SCA drehzahlvariabel angesteuert.

Das Linearantriebssystem bewegt die Kollektoren. Dabei wirken Zugkräfte abwechselnd in entgegengesetzter Richtung auf den Mitnahmebolzen zwischen den Parabolrinnen. Der Mitnahmebolzen im Schwerpunkt des Kollektors bewegt sich dank der Abrollgeometrie nur horizontal. Somit muss das Linearantriebssystem keine Vertikalkräfte und nur die horizontalen Abrollkräfte überwinden.

Aufgrund der vergleichsweise torsionsweichen offenen Querschnittsform sowie der hohen Eigenlast der Betonschalen wird das Linearantriebssystem mit dezentral installierten Elektrotriebmotoren ausgestattet. Um die Verdrehung des Kollektors in der SCA zu minimieren und einen Kollektorkollaps (unter Extrembedingungen) zu verhindern, sind die Antriebseinheiten zusätzlich über die Torsionswelle zwangssynchronisiert. Die Torsionswelle verbindet alle SCEs einer SCA und ist bei jeder Antriebseinheit mit 2 Kettenrädern und einer torsionssteifen Kupplung mit axialem Längenausgleich unterbrochen.

Die tragende Struktur der Lineareinheit besteht aus einem quadratischen Hohlprofil (aus Stahl), das an den Enden mit je einem Zahnradlager aus Stahlblech verbunden (geschweißt) ist. Das U-Profil dient der statischen Verbindung der Kettenradlager, so dass keine Kippmomente auf die Schnittstelle zum Betonsockel wirken.

Das Antriebssystem ist bis zu einer Windgeschwindigkeit von 33 m/s überlastsicher. Bei dieser Belastung kann der Kollektor nicht mehr bewegt werden, aber das Antriebssystem hält über die Motorbremsen die Kollektoren in Position. Alle Antriebselemente sind so dimensioniert, dass sie in diesem Fall ohne bleibende Verformung oder anderen Schäden überleben.

Wird die Energieversorgung unterbrochen, ist der Motor spannungslos, und eine separat gesteuerte Bremse auf dem hinteren Ende der Motorwelle hält den Motor und damit den Antrieb in der momentanen Position (Ruhestromprinzip). Dies verhindert, dass eventuelle Prozessrückstellkräfte den Antrieb unkontrolliert in eine der Endlagen bewegen.

#### Technische Daten:

- Fahrweg: 4400mm (=160°)
- Gesamtwinkelbewegung: +80° Zenit -80°
- Drehgeschwindigkeit: 10 - 15°/h (slow speed mode) bei 3Hz FU  
7°/min (fast speed mode) bei 100Hz FU
- Antriebskraft:  $F(\text{Nenn})=20\text{kN}$ ;  $F(\text{max})=40\text{kN}$
- Haltekraft:  $F(\text{Halt})=90\text{kN}$
- Stromverbrauch: ca. 0,6W/max
- Schutzklasse : IP65
- Arbeits-/Betriebstemperatur: -40°C/+60°C
- Lager-/Transporttemperatur: -25°C/+50°C

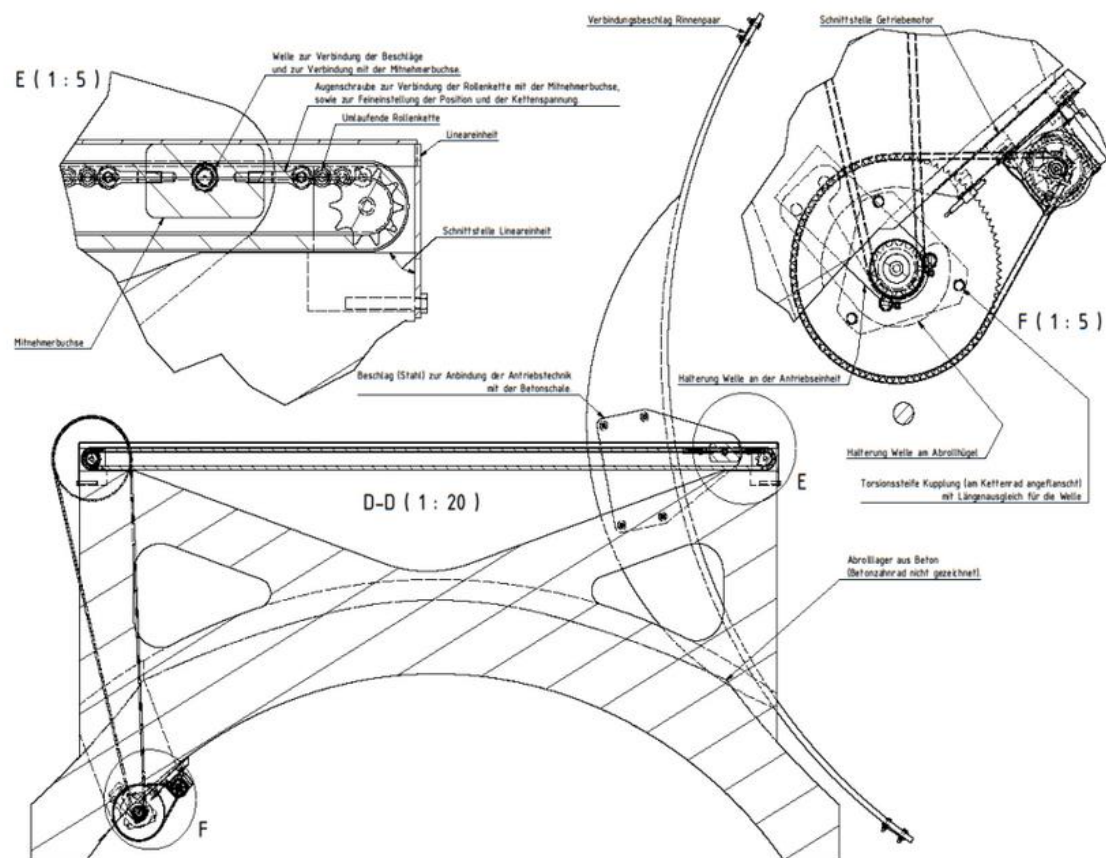


Abb 2.11.1 Details und Komponenten des Antriebs

## 12. Abstimmung der elektrischen Schnittstellen und Sensoren

Elektrische Schnittstelle zum Antriebssystem:

- Klemmenkasten am Elektromotor 400V/50Hz/90W pro Antrieb-Bremse 400V/AC

## 13. Konzeptstudie Langlebigkeit Antrieb

Im Bereich der Anwendung der ConSol-Spiegel sind die Komponenten alle gut belüftet, oder zum Teil von Spiegel gegen Niederschlag geschützt. Ein besonders aggressives und korrosives Umgebungsfeld wie etwa bei Salzbeaufschlagung in Wasserwechselzone liegt weder im Demonstrator Fall noch im großtechnischen Anwendungsfall in einer Wüstenregion vor.

Die Konstrukteure des Antriebs haben bei den Antriebskomponenten aus Wirtschaftlichkeitsgründen auf bewährte Standardbauteile zurückgegriffen, die im Maschinenbau bereits langjährig erfolgreich eingesetzt werden. Dies sind Elektromotor mit Getriebe, Kettenräder, Ketten, Spanner, Lager.

Es wurde bei der Auswahl und Ausbildung der Bauteile Wert gelegt auf eine ideale korrosionssichere Ausführung und konstruktive Durchbildung.

- Bei den Blechteilen handelt es sich um entweder sandgestrahlte und lackierte oder auch gestrahlte und verzinkte Bauteile.
- Die Schrauben sind verzinkt.
- Die Ketten sind mit O-Ringen gekapselte Ketten, die in den Gelenken damit gekapselt und selbstgeschmiert sind. Im Zweifelsfall ist ein schneller Austausch als Verschleißteil möglich.
- Die Zahnräder sind galvanisch geschützt, was bei einer trockenen oder gut belüfteten Umgebung als korrosionstechnisch unkritisch gesehen wird.
- Bei den Motoren/Getriebeeinheiten handelt es sich um außen lackierte und beschichtete Aluminiumgehäuse der Antriebseinheiten inklusive Getriebe.
- Die ausgesuchten Elemente wie das Getriebe oder der Motor sind gekapselt und innen Öl befüllt. Deren mechanische Innenleben sind somit mit einer korrosionshindernden langjährigen Dauerschmierung versehen. Es wurde so ausgewählt, dass Außenkontakt der bewegten Elemente nicht vorliegt.
- Das Gehäuse ist beschichtet und korrosionsgeschützt.
- Sollte es hier zu Undichtigkeiten und Leckagen kommen, ist ein Austausch von diesen einfachen kostengünstigen Standardkomponenten jederzeit Zeit kurzfristig und kostengünstig möglich.

Auf einen gesonderter Nachweis durch die Universität Stuttgart mit einer experimentellen Untersuchung der der Dauerhaftigkeit der verbauten Antriebskomponenten durch eine teure Langzeitexposition mit anschließenden Begutachtungen im Salz-Sprühnebel der Nordsee auf Helgoland konnte verzichtet werden, da keine neuartigen Werkstoffkombinationen oder wirklich neue Komponenten konstruiert werden mussten. Auch bei den neu konstruierten Teilen ist die Langlebigkeit durch konstruktiv bewährte Methoden des Maschinebaus bei der Auslegung und konstruktiven Durchbildung der Antriebseinheiten sichergestellt worden.

Durch die gesamten sorgfältig ergriffenen und abgewogenen Maßnahmen ist die Langlebigkeit der Anlage sicher gestellt.

## **14. Definition Komponentenschnittstellen**

Hier wird auf das vorhergehende Kapitel 10 mit seiner Aufzählung und das Kapitel 11 mit der Beschreibung verwiesen, in der diese Komponenten benannt sind.

## **15. Koordination Komponentengeometrie**

Um eine Wiederholung zu vermeiden wird auf das vorhergehende Kapitel 11 mit seiner Beschreibung verwiesen, in dem die Koordination und Abstimmung erläutert sind.

## 16. Erstellung Wartungskonzept

### 16.1. Allgemeines

Bei solarthermischen Kraftwerken ist es ein primäres Ziel, die Anlagenverfügbarkeit und die Effizienz der Energiegewinnung zu maximieren und gleichzeitig Wartungskosten und Umwelt- sowie Sicherheitsrisiken zu minimieren. Allgemein wird bei Wartungskonzepten der Focus darauf liegen, die Ausfallzeiten des Kraftwerks zu minimieren [1].

Für Komponenten, die Einfluss auf die Produktion haben, sollte eine nicht-invasive vorausschauende Wartungsanalyse durchgeführt werden, um zu ermitteln, wann eine vorbeugende Wartung durchgeführt werden sollte.

Wenn eine vorausschauende Wartungsanalyse nicht möglich ist, wird für die Bauteile, welche die Produktion beeinflussen, eine vorbeugende Wartung mit einem Anfangsintervall durchgeführt. Dieses wird danach angepasst, um das optimale Intervall für jede Wartungsmaßnahme zu finden.

Für Komponenten, die keinen Einfluss auf die Produktion haben, kann eine vorbeugende Wartung mit niedrigerer Priorität, wie z.B. visuelle Kontrolle, durchgeführt werden (außer bei Notfall- oder Sicherheitseinrichtungen).

Für Notfall- und Sicherheitseinrichtungen müssen periodische Funktionstests durchgeführt werden, um Verschleiß oder Störungen zu erkennen, welche die Zuverlässigkeit beeinträchtigen könnten.

Bei der zuverlässigkeitszentrierten Wartung müssen kritische Komponenten identifiziert und die Wartungsstrategie entsprechend optimiert werden.

Ursachenanalyse, eine Methode zur kontinuierlichen Verbesserung, kann langfristig zur Fehlersuche eingesetzt werden, indem die Ursachen von Problemen ermittelt werden.

### 16.2. Typische Wartungs-Kennzahlen

Beispiele für typische Wartungs-Kennzahlen sind [1]:

- Ausfall des Kraftwerks (weniger erzeugte MWh als geplant)
- Defizit an thermischer Energieausbeute im Solarfeld durch:
  - Beschädigte Receiver
  - Beschädigte Spiegel
  - Nicht trackende Kollektoren
- Gereinigte Spiegel pro Stunde Reinigungsmethode
- Reflektivität im Vergleich zu Reinigungszyklen und Reinigungsmethoden
- Defizit bei Gewinnung von elektrischer aus thermischer Energie im Power-Block (weniger MWh als geplant); wichtige Komponenten außer Betrieb oder funktionieren nicht korrekt.

- Korrekturmaßnahmen im Vergleich zu Vorbeugemaßnahmen
- Protokoll der durchgeführten Maßnahmen, nach Ursache und Priorität
- Ungeplanter Verbrauch von Überstunden

### 16.3. Wartungsaufwand

Als erster Anhaltspunkt zur Bestimmung der anfallenden Wartungsarbeiten soll eine Unterteilung der Kosten für Betrieb und Wartung solarthermischer Kraftwerke nach fixen und variablen Kosten dienen, die in Tabelle 1 gezeigt ist [2]. Bei dieser Gelegenheit wird für Betrieb und Wartung der Begriff O&M (Operation & Maintenance) eingeführt.

Die Fixkosten für O&M sind die Kosten für den Betrieb und die Wartung des solarthermischen Kraftwerks, unabhängig davon, wie viel Elektrizität erzeugt wird, d.h. unabhängig von der Anzahl der Betriebsstunden. Im Vergleich dazu sind die variablen Betriebs- und Wartungskosten eine Funktion des Betriebs der Anlage. D.h., je mehr Betriebsstunden, desto höher sind die variablen Betriebskosten.

Fixkosten für O&M:	Variable Kosten für O&M:
- Solarfeld	- Treibstoff
- HTF-System	- Wasser
- TES-System	- Elektrizität
- Power-Block, BOP, Zusatzbefeuerung	- Weitere (z.B. Stickstoff, andere Betriebsstoffe,
- Personal	

Tabelle 1: Unterteilung der Kosten für O&M nach fixen und variablen Kosten

Ein weitere Hilfestellung zur Bestimmung der anfallenden Wartungsarbeiten, zeigt Tabelle 2. Sie enthält eine Auflistung der jährlichen Gesamtkosten für Sachmittel, die im Rahmen eines Programms zur Verbesserung der O&M für den 150 MW Solarpark Kramer Junction (Parabolinnenkraftwerke SEGS III-VII) ermittelt wurden [3].

<b>Jährliche Kosten für Teile &amp; Materialien</b> Kramer Junction SEGS III-VII, Solarfeldgröße: 500.000 m <sup>2</sup>	
	\$K/Jahr
Spiegel	125,0
HCE's	481,7
Sonnensensoren	0,7
LOC (Lokale Kollektorsteuerungseinheit)	0,9
Ball Joints	19,3

Hydraulischer Antrieb	27,5
Sonstiges	33,6 (Annahme: 5% der obigen Materialien)
HTF-Pumpendichtungen	2,4
HTF-Ersatz	42,2
Wasser	Demineralisiertes Wasser zum Waschen der Spiegel
Jahressumme:	976,5

Tabelle 2: Unterteilung der Kosten für O&M nach fixen und variablen Kosten

## 16.4. Wartungsplan

Es ist schwierig, von einer spezifischen O&M-Struktur und -Vorgehensweise auf die sich tatsächlich ergebenden langfristigen O&M-Kosten zu schließen. Zwar können durch den Einsatz von vorausschauenden und vorbeugenden O&M-Maßnahmen auf lange Sicht zweifellos O&M-Kosten eingespart werden, kurzfristig ergeben sich dadurch natürlich höhere O&M-Kosten [3].

Außerdem werden die Anforderungen und die Komplexität des O&M-Programms stark von der Auswahl und der anfänglichen Investition in die Komponenten und Ausrüstungen vor allem des Solarfeldes und der weiteren Anlagenkomponenten beeinflusst.

An dieser Stelle soll lediglich ein Vorschlag für ein anfängliches Wartungskonzept gemacht werden. Hierzu wurden die Wartungs-Kennzahlen aus Kapitel 16.2 und die Angaben aus Tabelle 1 und 2 verwendet. Die durchzuführenden Wartungsarbeiten für ein Parabolrinnenkraftwerk sind in Tabelle 3 zusammengestellt:

Anfallende Wartungsarbeiten	Wartungsintervall: Periodisch (vorbeugend) / nach Bedarf (korrigierend)
<b>Solarfeld:</b>	
- Sichtprüfung HCE's (Glashüllrohre, Absorberrohre)	periodisch
- Austausch beschädigter HCE's	nach Bedarf
- Sichtprüfung Spiegel	periodisch
- Austausch beschädigter Spiegel	nach Bedarf
- Check, ob Kollektor im Track	periodisch
- Messung der Reflektivität der Spiegel	periodisch
- Reinigung der Spiegel	nach Bedarf
- Reparatur bzw. Austausch defekter LOC's	nach Bedarf
- Sichtprüfung Kollektorantrieb	periodisch



<b>HTF-System:</b>	
- Sichtprüfung der Ball Joints auf Undichtigkeiten	periodisch
- Nachpacken der Graphitdichtungen undichter Ball Joints	nach Bedarf
- Austausch von Pumpendichtungen	periodisch und nach Bedarf
- Ersatz von HTF	periodisch
<b>Power-Block:</b>	
- Spezifische Wartung des Power-Block	periodisch
<b>BOP:</b>	
- Spezifische Wartung des BOP	periodisch
<b>Weiteres:</b>	
- Spezifische Wartung der Zusatzbefeuerung, falls vorhanden	periodisch
- Funktionsprüfung der Notfall- und Sicherheitseinrichtungen	periodisch

Tabelle 3: Anfallende Wartungsarbeiten

## Literaturverzeichnis

- [1] S. Frier, „O&M Program Optimization,“ in *CSP Today USA 2012*, Las Vegas, NV, 2012.
- [2] T. Hirsch u. a., „SolarPACES Guideline for Bankable STE Yield Assessment,“ IEA Technology Collaboration Programme SolarPACES, 2017.
- [3] G. E. Cohen, D. W. Kearney und G. J. Kolb, „Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants,“ Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA, Boron, California 93516, 1999.

# ConSol

Concrete Solar Collector

## Bericht AP 3

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011  
Förderkennzeichen: FKZ A-G  
Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH

# 1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis.....	2
1.	Dokumenthistorie .....	3
2.	Einführung.....	4
2.1.	Schnittstellen.....	4
3.	Konzeptionierung einer Feldfabrik .....	5
3.1.	Stichpunkte zur Feldfabrik: .....	5
3.2.	Konzept der Stahlschalungen.....	6
3.3.	Die Fertigung in der Feldfabrik .....	7
3.4.	Bewehrung der Fertigteile .....	14
3.5.	Vorstellung der weiteren Fertigteile .....	16
3.5.1.	Die Blockfundamente .....	16
3.5.2.	Das Randaufleger sowie dessen Köcherfundament .....	17
3.5.3.	Das Mittelaufleger sowie dessen Köcherfundament .....	18
3.5.4.	Der Antriebsbock.....	19
3.5.5.	Die Sichel.....	19
3.5.6.	Die Gesamtanlage mit allen Bauteilen.....	21
3.6.	Die Lagerung in der Feldfabrik .....	22
3.7.	Der Wendevorgang .....	25
4.	Konzeptionierung Schalungstechnik.....	26
4.1.	Konzept Demonstratorschalung .....	26
4.2.	Konzept Realschalung in der Feldfabrik .....	28
5.	Mitwirkung bei Beton- und Bewehrungstechnik .....	29
5.1.	Besuch bei Dyckerhoff in Wiesbaden .....	29
5.2.	Herstellung des Nanodur im eigenen Werk .....	33
5.3.	Herstellung von Testsegmenten für Auszugversuche.....	34
6.	Realisierung Demonstrator.....	37
6.1.	Erwirkung einer Baugenehmigung.....	37
6.2.	Herstellung eines 1,5 m breiten Testmodules.....	37
6.3.	Herstellung der beiden 12 m Demonstratormodule.....	44
6.4.	Wenden der Demonstratormodule.....	53
6.5.	Montage der Demonstratormodule .....	61
6.5.1.	Vorbereitende Arbeiten auf dem Baufeld.....	61

6.5.2.	Die eigentliche Hauptmontage .....	64
7.	Transport- und Montagekonzept.....	69
7.1.	Verladung und Transport zur Montagestelle .....	69
7.2.	Wenden und Vormontage Halbschalen .....	71
7.3.	Montage im Baufeld .....	72
8.	Kostenschätzung und Kostenermittlung .....	74
8.1.	Kosten der Betonfertigteile .....	74
8.2.	Kosten und Mengenermittlung für die Betonherstellung .....	80
8.3.	Kosten für die Feldinstallation .....	84
8.3.1	Investitionskosten für die Feldinstallation.....	84
8.3.2	Personalkosten Feldinstallation .....	86
8.4.	Kosten für weitere Komponenten .....	89

## 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	29.01.2016	Tobias Stanecker	Konzeption Schalungstechnik Demonstrator
2	09.02.2016	Tobias Stanecker	Konzeption Feldfabrik
3	19.02.2016	Tobias Stanecker	Herstellung Nanodur
4	29.03.2016	Tobias Stanecker	Herstellung Nanodur
5	09.06.2016	Tobias Stanecker	Schalungskonzept/Betonherstellung
6	19.09.2016	Tobias Stanecker	Konzeption Feldfabrik
7	28.11.2016	Tobias Stanecker	Auszugsversuche mit Fa. Pfeifer
8	12.12.2016	Tobias Stanecker	Feldfabrik
9	15.06.2017	Tobias Stanecker	Herstellung des Testsegmentes
10	07.08.2017	Tobias Stanecker	Produktion der Halbschalen
11	02.01.2018	Tobias Stanecker	Produktion der Halbschalen
12	05.02.2018	Tobias Stanecker	Transport- und Montagekonzept
13	19.02.2018	Tobias Stanecker	Kalkulation der Herstellungskosten
14	19.04.2018	Tobias Stanecker	Beschreibung Drehen und Montage
15	30.05.2018	Tobias Stanecker	Restarbeiten/Formgebung
16	04.07.2018	Timo Zippler	Finalisierung Transport und Montagekonzept und Kostenermittlung
17	12.07.2018	Dirk Krüger	Einführung, Überarbeitung

## **2. Einführung**

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 3

Ziel war es, Konzepte für die Schalungstechnik und Fertigung zu entwickeln und die Kosten für den Solarfeldbau zu bestimmen.

Der Aufbau und die damit verbundenen Kosten für die Fertigung in einer Feldfabrik wurden detailliert für ein Kollektorfeld mit der Größe des Andasol Kraftwerks (510.000<sup>2</sup>) nach Investitionen, Personal- und Materialkosten aufgeschlüsselt und ermittelt.

Eine Schalform wurde entsprechend den vorgegebenen Maßen gefertigt. Darin wurden erfolgreich zwei Kollektorschalen für den Prototypen gegossen.

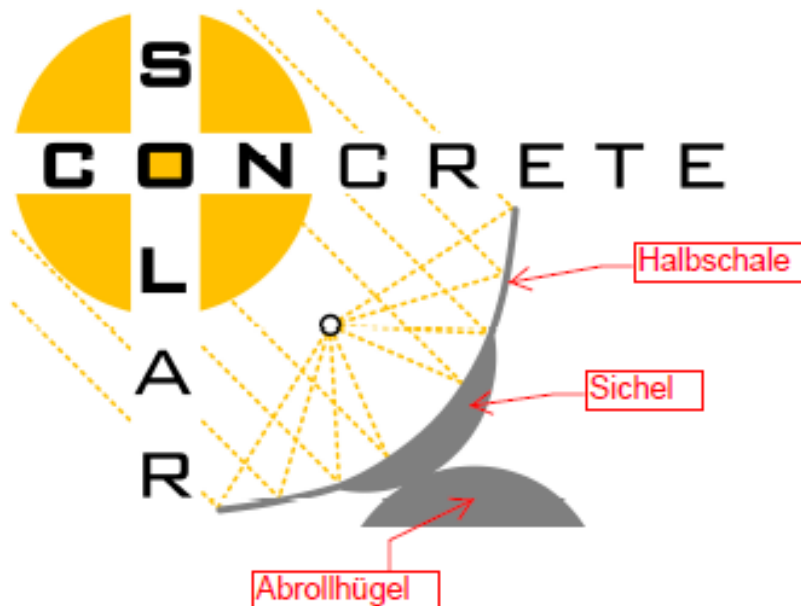
### **2.1. Schnittstellen**

Die Aufgaben im Arbeitspaket AP 3 stehen in Wechselwirkung mit den Arbeitspaketen 1.1.1 (Betontechnik) und 1.2 (Konstruktion Konzentratorstruktur) und liefert Grundlagen zur Fertigung des Demo-Moduls (Arbeitspaket 4). Die Ergebnisse des Arbeitspaketes AP 3 sind außerdem Grundlage für die Bearbeitung des AP 5 (Kostenanalyse und Zukunftskonzepte).

### 3. Konzeptionierung einer Feldfabrik

Paderborn, 12.12.2016

Zur Verdeutlichung der „Vokabeln“, die im Projekt gebräuchlich geworden sind, soll folgende Skizze dienen:



#### 3.1. Stichpunkte zur Feldfabrik:

Stückzahl Fertigteile je Baufeld:	7.500	Stück Halbschalen
	15.000	Stück Sichel
	15.000	Stück Abrollhügel
	22.500	Stück Fundamente
	3.750	Stück Antriebsblöcke
Produktionszeit laut Vorgabe DLR:	12 Monate	
Annahme:	50 Wochen, 6 AT/Woche, also 300 AT	
	3-schichtige Produktion	
daraus resultierende Tagesleistung:	25 Stück	Halbschalen
	50 Stück	Sichel
	50 Stück	Abrollhügel
	75 Stück	Fundamente
	12,5 Stück	Antriebsblöcke

Die Investitionskosten für die Feldfabrik sollen nicht am Ende des einen fiktiv unterstellten Projektes amortisiert sein. Ganz im Gegenteil soll davon ausgegangen werden, dass die Feldfabrik zum nächsten Standort umzieht und dort erneut die Fertigung aufnimmt, so dass insgesamt deutlich höhere Stückzahlen als die genannten 7.500 Einheiten unterstellt werden.

### **3.2.      *Konzept der Stahlschalungen***

Wir verfolgen aus Kostengründen (Zielwert: ca. 35 €/m<sup>2</sup> Betonschale) weder das Konzept einer Gleitfertigung noch das einer sehr kurzfristigen Taktung und vielfachen Belegung einer Form je Tag. Derartige Formen würden neben immensen Investitionskosten enorme Anstrengungen und Kosten bei der Betonproduktion und -verarbeitung nach sich ziehen.

Wir gehen von konventionellen ein bis zwei Belegungen je Form und Tag aus und werden stationäre Betonformen vorschlagen. Die Fertigung wird in einer Zeltumgebung erfolgen, direkt neben der mobilen Betonherstellung. Der Beton wird entweder mittels Pumpen gefördert oder alternativ herkömmlich aus einem Betonverteiler gegossen, die fertigen Teile werden mit Kränen bewegt und mit speziellen Gestellen und Aufliegern transportiert.

Ein wesentlicher Kostenfaktor ist die Anzahl der benötigten Formen. Wir haben die Formen bereits bei einem uns vertrauten Maschinenbau-Unternehmen angefragt, der Rücklauf steht noch aus. Wir schätzen die Formenkosten auf einen Betrag im 6-stelligen Bereich je Einheit, so dass es wesentlich ist, die Anzahl der Formen nicht zu groß werden zu lassen.

Mit vorgenannten Überlegungen haben wir Kontakt zur Fa. Dyckerhoff aufgenommen und nach deren Meinung zu einem 2-Schichtbetrieb gefragt, sprich jede Form 2 Mal je Tag zu belegen. Folgende Antwort haben wir erhalten:

**Von:** Bernhard Sagmeister [<mailto:sagmeister@durcrete.de>]

**Gesendet:** Dienstag, 2. Februar 2016 18:54

**An:** Tobias Stanecker | Stanecker Betonfertigteilewerk

**Betreff:** WG: Frage

Guten Tag Herr Stanecker,

ich denke, wenn man mit Heißdampf auf 80°C heizt, wird die Sache schnell genug, so dass man nach 12 Stunden ausschalen kann.

Prinzipiell ist ja wegen dem Hüttensand das System kein superschnelles, aber Temperatur bewirkt sehr vieles.

Was bisher noch nicht untersucht worden ist, wie sich eine Erwärmung des Betons während des Erstarrens und Erhärtens auswirkt. Wir haben bisher nur Wärmebehandlungen an bereits erhärteten und ausgeschalteten Bauteilen untersucht. Ich habe mal in einem Garagenwerk gearbeitet, und weiß, dass das schon Auswirkungen auf die Endfestigkeit und Rissbil-

ung hat. Das Schwinden und Kriechen kann eventuell positiv beeinflusst werden. Das sollte die Universität doch mal untersuchen!

Bitte denken Sie daran, dass bei Betonkontakt mit einer heißen Schalung sofort a) Wasser verdampft und b) das Fließmittel seine Wirkung verliert. Das bedeutet, das Material fließt Ihnen nicht in den Schlitz hinein, sondern sie haben sofort einen festen Stopfer.

Mit freundlichen Grüßen / Best Regards

Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister

---

 durcrete Maschinenbauteile und Elemente aus Ultra High Performance Concrete UHPC

Mobile +49 160 58 40 373 ■ Telefon +49 6431 58 40 376 ■ Fax +49 6431 58 40 377 ■ E-Mail [Sagmeister@durcrete.de](mailto:Sagmeister@durcrete.de) ■

durcrete GmbH ■ Am Renngraben 7 ■ D-65549 Limburg/Lahn ■ Postfach 1322 ■ D-65533 Limburg ■ Germany ■

[info@durcrete.de](mailto:info@durcrete.de) ■ [www.durcrete.de](http://www.durcrete.de) ■ Sitz Limburg a. d. Lahn ■ Amtsgericht Limburg HRB 4483 ■

Geschäftsführer B. Sagmeister ■ USt-IdNr.: DE268482655 ■ TECHNOLOGIEPARTNER DYCKERHOFF NANODUR® ■

Wir teilen diesen Ansatz finden und empfehlen dahingehende Untersuchungen. Wir bestätigen den letzten Satz von Herrn Sagmeister, gleiche Erfahrungen machen wir in der Praxis auch. Unser Konzept sähe vor, die Form mit Umgebungstemperatur zu befüllen und dann erst Wärme hinzuzugeben. Es würde nach ca. 9 h wieder entschalt.

### **3.3. Die Fertigung in der Feldfabrik**

Paderborn, 19.09.2016

Die Abläufe in der Feldfabrik sollen an dieser Stelle zunächst Stichpunktartig beschrieben und dann im Folgenden näher erklärt werden.

- Produktion von 25 Halbschalen/Tag mit zweimaliger Belegung der einzelnen Formen
- zweimaliges Ausschalen der fertigen Teile je Tag und Transport ins Zwischenlager, Lagerung dort auf Gestellen in Produktionslage (über Kopf)
- Produktion von 50 Sichel und 50 Abrollhügeln je Tag
- Lagerung für 30 Tage
- Entnahme aus dem Lager nach dem Prinzip „first in – first out“, also immer die ältesten Fertigteile verwenden
- Montage der halbkreisförmigen „Sicheln“ auf der Rückseite der Halbschale
- Wenden des Fertigteiles in die Einbauposition
- Applizieren des Spiegelmaterials
- Verladung und Transport in das Baufeld zur Montage

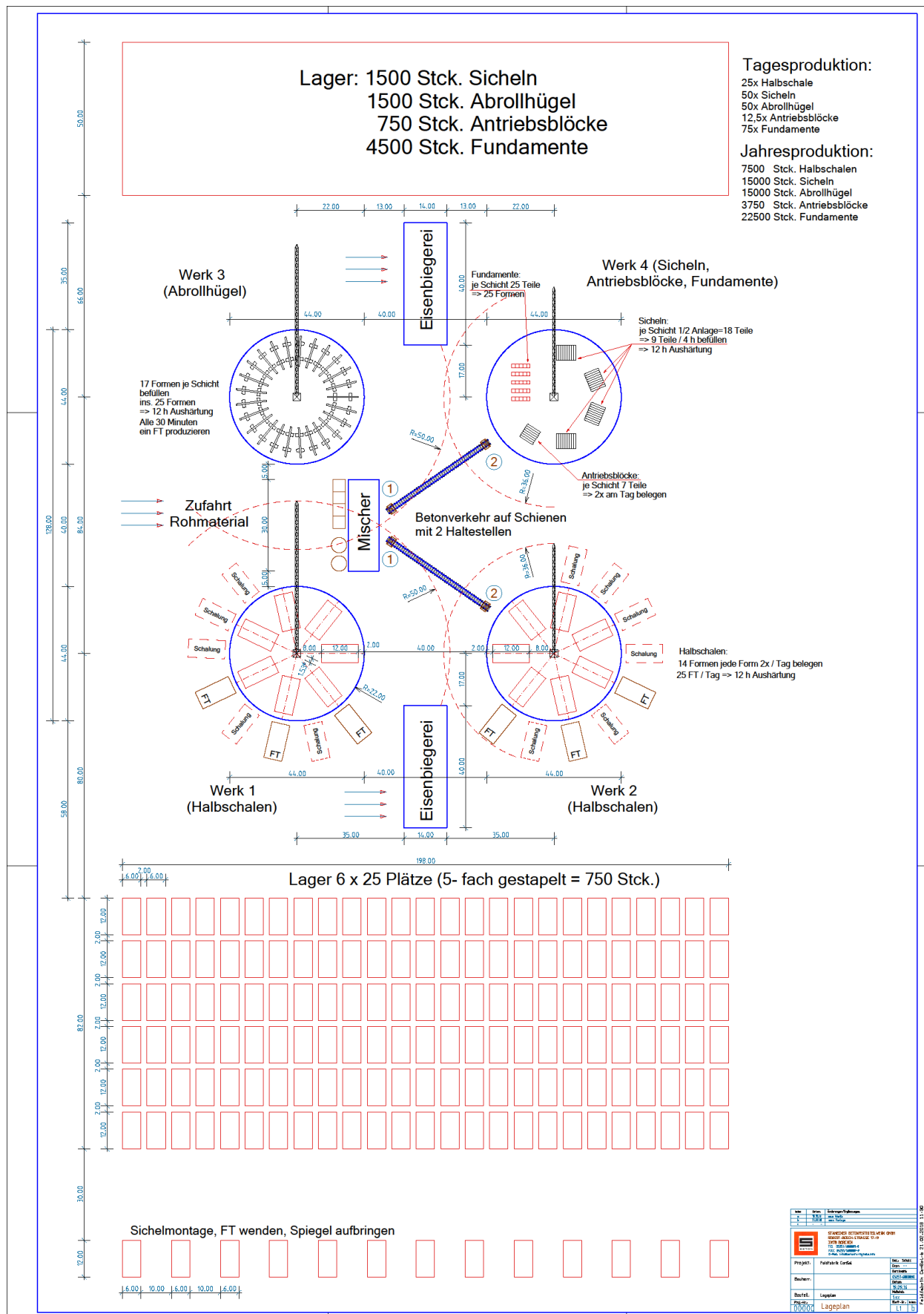
Die Feldfabrik muss ohne Einschränkungen voll funktionstüchtig, dennoch kostengünstig und modular aufgebaut werden. Unter den Voraussetzungen, dass in nicht urbanem Umfeld produziert werden soll sind Ansätze einer Produktion in umliegenden Hallen nicht denkbar. Au-



ßerdem würden solche Ansätze zu zusätzlichen Transportkosten führen. Die Produktion soll aus Gründen der Effizienz in direkter Nähe zum Baufeld erfolgen. Weiterhin sollte nahezu die komplette Produktionsstruktur demontierbar sein und am nächsten Einsatzort wiederverwendet werden können.

Der nachfolgende Plan stellt die Feldfabrik als Skizze dar. Auf der Team-Webseite ist dieser als pdf-Datei abgelegt, der Plan ist zu groß, um ihn in diesem Dokument sinnvoll abbilden zu können.

Als zentraler Mittelpunkt der Anlage steht der Betonmischer in der Mitte. Um ihn herum werden vier große Zelte mit Turmdrehkränen aufgebaut. In diesen Zelten werden die Fertigteile produziert. Jeweils zwischen den Zelten sind oben und unten zwischen den Produktionsbereichen Arbeitsflächen für Eisenbieger geplant, welche die Bewehrung bereitstellen. Die Materialbelieferung mit Rohstoffen erfolgt von der linken Seite, die Auslagerung der fertigen Teile wird jeweils nach oben und unten erfolgen.



Die Betonmischanlage würde als schlüsselfertiges logistisches Konzept von einem Maschinenausrüster angemietet werden. Der Erwerb einer solchen Anlage steht finanziell in keinem denkbaren Zusammenhang zur Gesamtstückzahl. Der Betonmischer muss mindestens so ausgelegt werden, dass die halbe Betonmenge eines Fertigteiles auf einmal hergestellt werden kann. Ausgehend von rund 4 m<sup>3</sup> Beton je Halbschale handelt es sich also um eine 2 m<sup>3</sup>-Mischung je Mischvorgang. Diese Mischmenge ist aufgrund des Widerstandes, den der Beton aufgrund seiner zähen Eigenschaften entwickelt, bereits sehr ambitioniert. Der Betonverteiler würde zwei Betonmischungen, also das volle Volumen von 4 m<sup>3</sup> eines Fertigteiles fassen. Somit ist gewährleistet, dass jedes Fertigteil in einem Guss betoniert werden kann, ohne dass Ansätze oder Absätze entstehen, welche die Fertigteilstruktur stark negativ beeinträchtigen würden.

<https://www.youtube.com/watch?v=0oHJe8cZaHw>



Bild: Betonmischanlage - Supermobil

## Beschreibung

Eine Betonmischanlage besteht aus mehreren Modulen. Von einem Steuerraum (1) aus werden die einzelnen Vorgänge gesteuert. In den Vorratssilos (2) lagern die verschiedenen Gesteinskörnungen, die durch eine Klappe an der Unterseite auf ein Förderband (3) fallen. Das Förderband (3) ist zugleich eine Waage. Von dort aus kommt die Gesteinskörnung in den Beschicker (4), welcher die Mischtrommel (8) befüllt. Zeitgleich wird Zement aus dem Zementsilo (5) mit Hilfe einer Förderschnecke (6) in die dazugehörige Zementwaage (7) befördert. Nach dem Vermischen der einzelnen Gesteinskörnungen kommt der abgewogene Zement in die Mischung. Seitlich an der Mischtrommel (8) befindet sich ein Ventil (10), das für die Dosierung des Anmachwassers zuständig ist. Auf einer zweiten Waage (9) werden die benötigten Zusatzmittel gewogen und zusammen mit dem Anmachwasser zeitgleich in die Mischtrommel (8) dosiert.

- (1) Steuerraum
- (2) Vorratssilos für Sand und Splitt
- (3) Förderband/Waage für die Gesteinskörnung
- (4) Beschicker
- (5) Silo für Zement, Kalksteinmehl oder Nanodur®
- (6) Förderschnecke
- (7) Waage für Zement, Kalksteinmehl oder Nanodur®
- (8) Mischtrommel
- (9) Waage für Fließmittel und Schwindreduzierer
- (10) Ventil zur Wasserdosierung

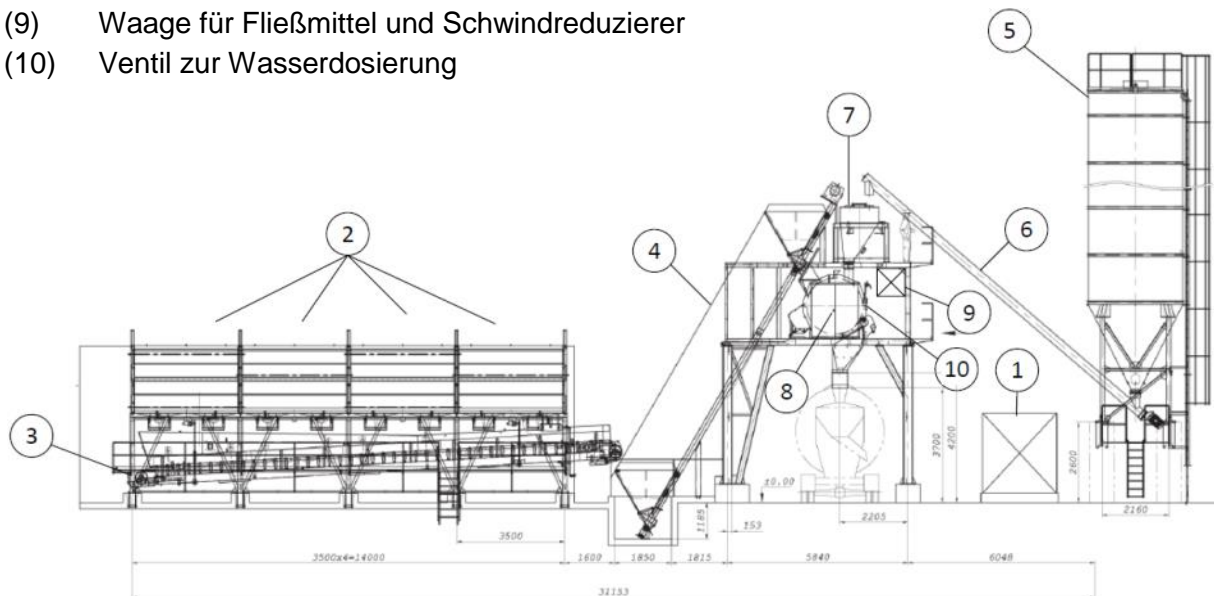


Bild: Darstellung einer mobilen Mischanlage

Die Zuschläge für den Beton würden auf Halde gelagert werden, für den Nanodur (Zement) werden Silokapazitäten eingerichtet.

Als minimaler zeitlicher Vorlauf für die Installation der Mischanlage ab dem Tag des Bekanntwerdens des Projektes setzen wir ein Jahr an. Besonders viel Zeit wird die Planung der Mischanlage sowie deren Ausschreibung benötigen.

Die Fertigung erfolgt in Zelten, in deren Mitte ein ausreichend dimensionierter Turmdrehkran, ein sogenannter „Untendreher“, montiert ist. Bei diesem Konzept handelt es sich nicht um eine Idee von uns, sondern, wie nachfolgende Bilder zeigen, um bereits realisierte Produktionsstandorte von Fertigteilproduktionen unter ähnlichen wüstenartigen Bedingungen als Feldfabriken. Das Konzept hat uns überzeugt. Es ist einfach, kostengünstig und funktionell.



Bild: Produktionszelt einer Feldfabrik im Oman, Quelle Avermann



Bild: Produktionszelt einer Feldfabrik im Oman, Quelle Avermann





Bild: Produktionszelt einer Feldfabrik im Oman, Quelle Avermann

Wir haben zeichnerische Untersuchungen gemacht, ob es möglich ist, alle Formen in zwei große Zelte unterzubringen. Letztendlich haben wir uns dagegen entschieden, da der Durchmesser der Produktionsstätte zu groß würde und damit die Auslegung des Kranes aufgrund vergrößerter Kranausleger zu aufwendig wäre. Weiterhin würde wahrscheinlich ein Kran eine zu geringe Kapazität für die Herstellung von 25 Fertigteilen am Tag bedeuten. Aus vorgenannten Gründen haben wir uns für zwei Produktionsstätten mit jeweils einem Kran entschieden.

Zunächst wird eine Betonsohle vor Ort gegossen, die gleichzeitig Fußboden als auch Fundament darstellt. Auf dieser Sohle werden der Kran, die Formen sowie feststehende Seitenwände montiert. Den oberen Abschluss der Seitenwände stellt ein Schienensystem dar. Die gesamte Zeltdachkonstruktion ist fest am Kran montiert und wird mit diesem sowie seitlich angebrachten Hilfsmotoren angetrieben. Das Dach dreht sich, aufgelagert auf den Seitenwänden, exakt mit dem Kran mit. Unterhalb des Kranauslegers befindet sich eine große Öffnung im Zeltdach. Diese dient der Bestückung der Produktion mit Material sowie der Entnahme der fertigen Teile.

Die Betonmischanlage befindet sich zwischen den Produktionsstätten, so dass die Kräne die gefüllten Betonverteiler übernehmen und zur jeweiligen fertig eingeschalteten Form heben können. Weiterhin befindet sich jeweils oben und unten zwischen den Zelten eine Eisenbiegerei, welche zur Erstellung der Bewehrung benötigt wird. Auf für diesen Part werden Krankapazitäten benötigt. Die untere Eisenbiegerei zwischen Werk 1 und 2 stellt die Bewehr-

rung für die Halbschalen her, die obere Eisenbiegerei zwischen Werk 3 und 4 produziert die Bewehrung für die Sichel und Abrollhügel.

Fertige Teile werden außerhalb des Produktionszelttes mittels des Turmdrehkranes auf Untergestelle abgelegt und dort von einem fahrbaren Lagerkran übernommen, der die Teile ins Lager verfährt und dort ablegt.

Bei diesem Kran denken wir an fahrbare Brückenkräne, wie man sie z. Bsp. aus dem Hafenbetrieb an großen Containerterminals kennt.

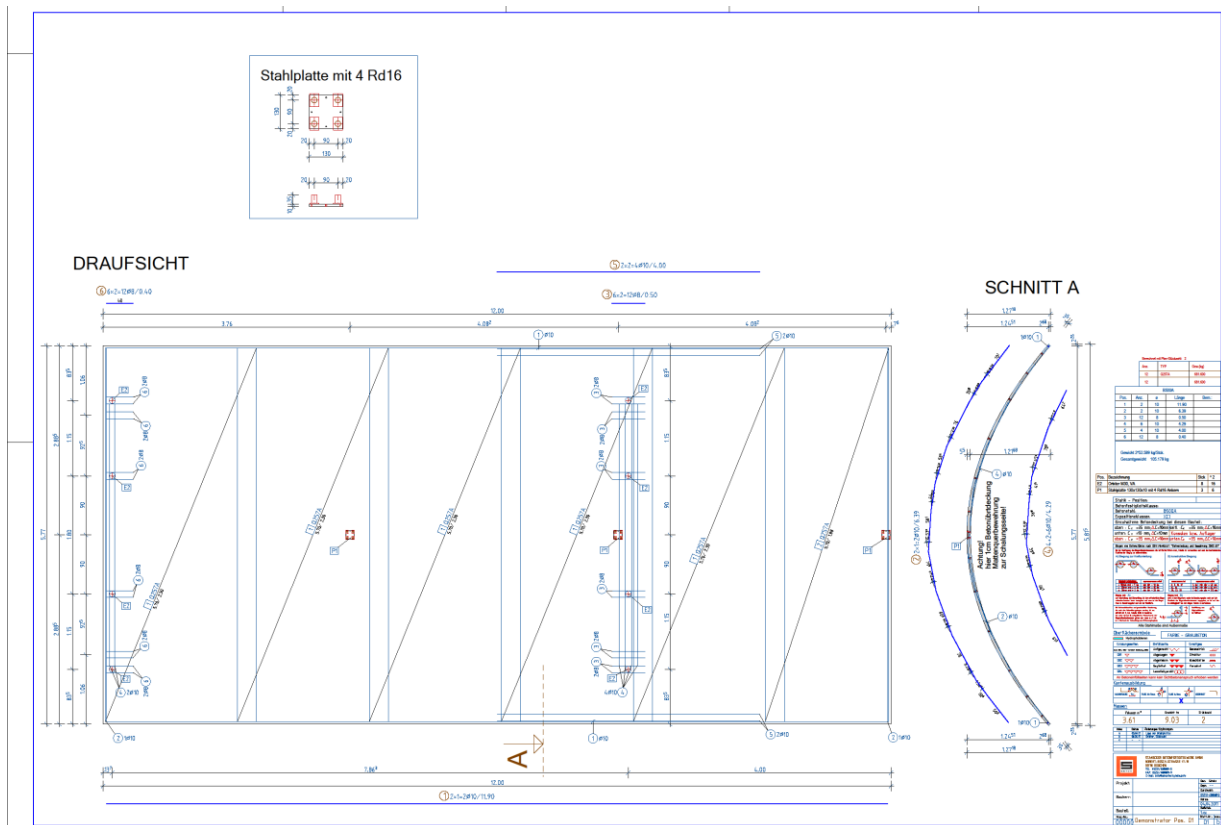


Bild: fahrbarer Portalkran, Quelle Avermann

Alternativ wäre selbstverständlich die Einrichtung eines fahrbaren Portalkranes auf Schienen ebenfalls möglich, jedoch sind die Investitionskosten und die vorbereitenden Tätigkeiten dafür zu hoch.

### **3.4.      *Bewehrung der Fertigteile***

Das Thema Bewehrung wurde im Projekt intensiv diskutiert. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass eine Bewehrung der Halbschalen nicht notwendig ist, da die Fertigteilhalbschalen theoretisch den Zustand 1 (ungerissener Beton) nicht verlassen sollen. Um Sicherheitsaspekten genüge zu leisten entschied man sich letztendlich dazu, dennoch die Fertigteile zu bewehren. Schlussendlich wird nun eine Bewehrung eingebaut, die wesentlich tragend ist und sogar auf einen bestimmten definierten Abstand zur Oberseite der Halbschalen einzubauen ist. Entsprechend der Bemessung durch die RUB haben wir folgenden Bewehrungsplan erstellt:



Das Thema Betonüberdeckung muss kritisch betrachtet werden. Die Bewehrungsüberdeckung, welche nach unserer gängigen DIN gefordert wird, kann bei dem geringen Bauteildicken der Halbschalen nicht erreicht werden. Die Baustahlbewehrung wird nahe an der Betonoberfläche eingebaut. Nach unseren europäischen Normen ist diese Bewehrung aus nicht rostenden Materialien auszuführen. Darauf weisen wir eindeutig hin. Im Projekt ist man der Meinung und hat dieses im Labor nachgewiesen, dass die deutlich höhere Dichtigkeit des Nanodur gegenüber herkömmlichem Beton und das deutlich trockenere Klima in den Verwendungsländern eine Unterschreitung der Betonüberdeckung zulässt.

Im Baufeld werden wie bereits beschrieben zwischen den beiden Produktionsflächen jeweils eine Fläche für Bewehrungsarbeiten eingeplant. Sicherlich wäre der Optimalfall eine automatische Mattenschweißanlage. Diese ist jedoch aufgrund des dafür notwendigen finanziellen Aufwandes nicht denkbar.

Wir würden Kontakt mit örtlichen Biegereinen aufnehmen und das benötigte Material fertig konfektioniert geschnitten und gebogen zur Baustelle liefern lassen. Vor Ort muss dieses gelieferte Material lediglich noch zusammengefügt und mit Abstandhaltern versehen werden. Dazu wird in dem entsprechenden Bereich je ein auf Schienensystemen fahrbares Zelt installiert, so dass die dort arbeitenden Mitarbeiter vor der Sonneneinstrahlung geschützt sind. Das Zelt muss fahrbar sein, um die fertige Bewehrung nach oben mit dem Kran entnehmen zu können.

Die Bewehrung komplett fertig anliefern zu lassen würden wir nicht bevorzugen. Letztendlich ist es egal, ob dieser Schritt auf der Baustelle oder beim Biegebetrieb ausgeführt wird. Problematisch ist bei fertig gebundener Bewehrung der Transport. Bedingt durch Stra-



ßenunebenheiten lösen sich die Rödelverbindungen. Das funktioniert nicht einmal bei deutschen Straßenverhältnissen, somit noch weniger auf unbefestigten Straßen, von denen vor Ort auszugehen ist. Zu transportierende komplette Bewehrungen müsste man verschweißen, leider wiederum ein zu kostenintensiver Vorgang.

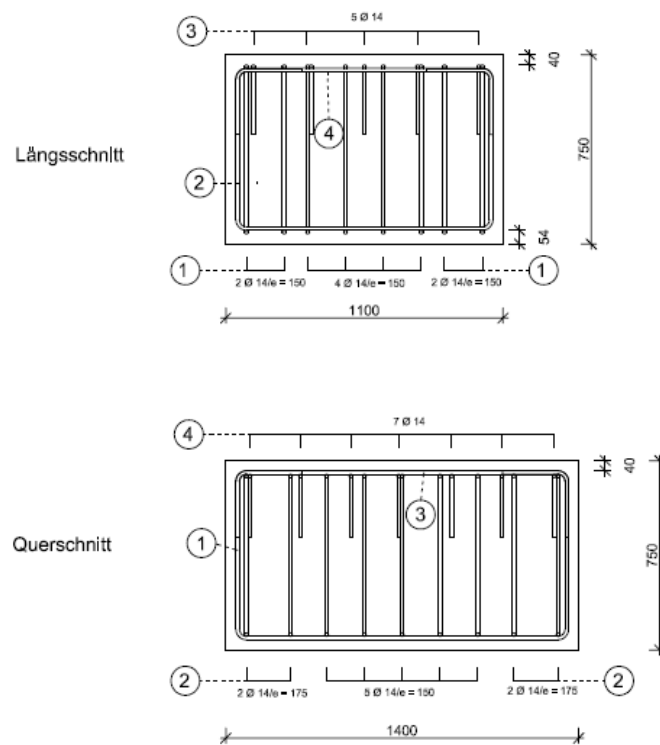
**Bedingt durch den zusätzlichen Materialeinsatz sowie die umständliche gebogene Verarbeitung des Baustahles ist es nicht mehr möglich, die Vorgabe von 35 €/qm für die reine Betonleistung einzuhalten.**

### **3.5.      *Vorstellung der weiteren Fertigteile***

Vorrangig konzentrieren sich unsere Arbeiten auf die Betonhalbschale, welche zuvor unter dem Punkt „Bewehrung“ auch schon als Abbildung dargestellt worden ist. Die Fertigteile der Unterbauten werden an der TU Kaiserslautern konzipiert und hergestellt. Nach erfolgter Produktion werden diese zu uns ins Werk geliefert und hier von uns aufgebaut. Da im Folgenden die Feldfabrik erklärt und im Anschluss eine Kostenkalkulation erfolgen soll, möchte ich dem interessierten Leser die Bauteile neben den Halbschalen kurz vorstellen, betone aber, dass es sich komplett um Unterlagen der TU Kaiserslautern handelt.

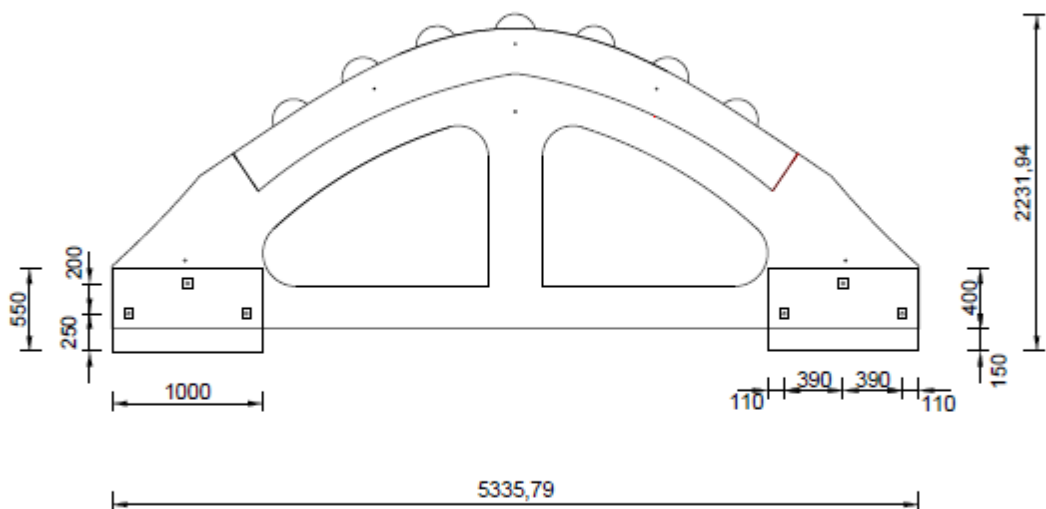
#### **3.5.1. Die Blockfundamente**

Die Blockfundamente sind einfache Betonquarder, die rein als Gründungselemente dienen. Diese werden vorgefertigt und mit Gewindestangen versehen, so dass die aufgehenden Bauteile über Verschraubungen verbunden werden können.



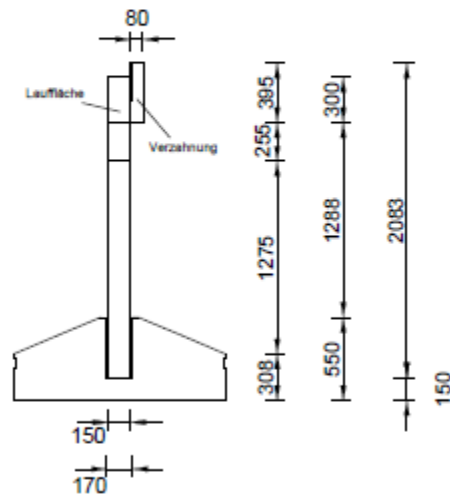
### 3.5.2. Das Randaufleger sowie dessen Köcherfundament

Abrolllager Randaufleger:



M 1:40  
Datum: 23.10.17

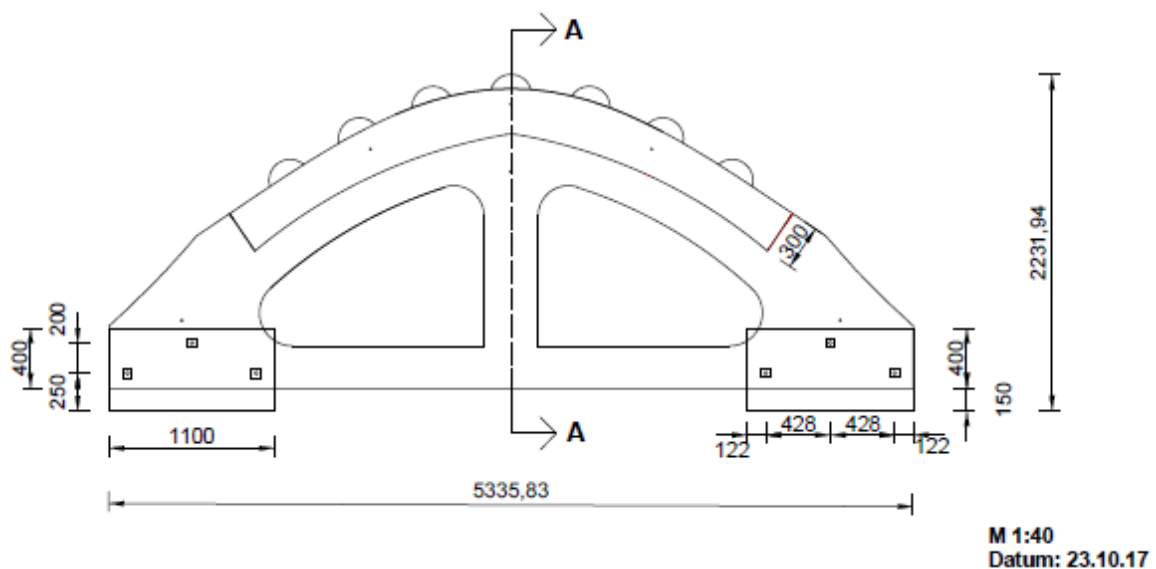
### Schnitt A- A



M 1:40  
Datum: 23.10.17

### 3.5.3. Das Mittelaufleger sowie dessen Köcherfundament

#### Abrolllager Mittelaufleger:



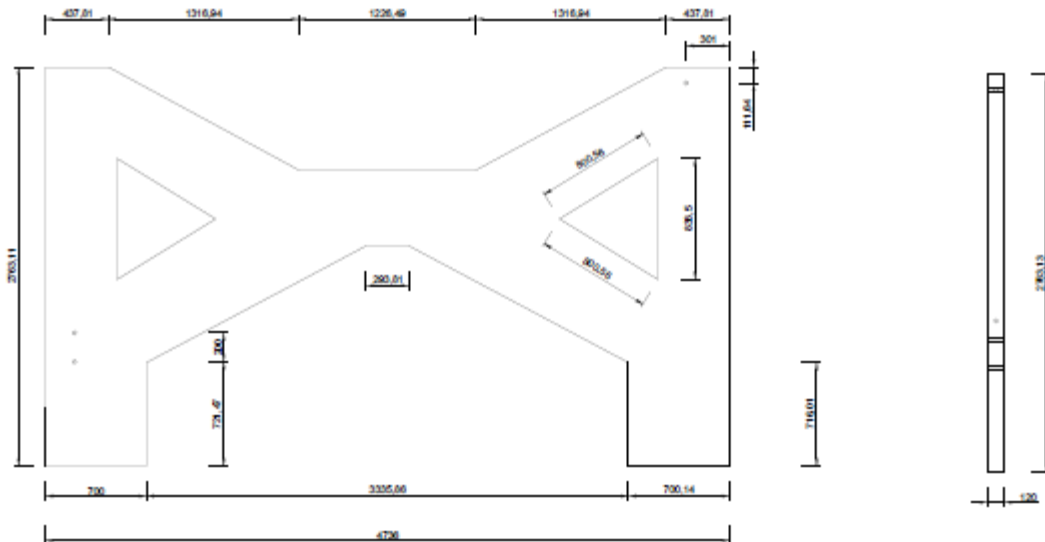
M 1:40  
Datum: 23.10.17

Beide Auflagertypen werden auf den im Boden befindlichen Fundamenten verankert und bilden die sogenannten Abrollhügel, auf denen die Halbschalen später drehen können.

### 3.5.4. Der Antriebsbock

Der Antriebsbock ist ein wandartiges Bauteil, dass zwischen den beiden Halbschalen montiert wird und als Grundlage der Antriebsbefestigung dient.

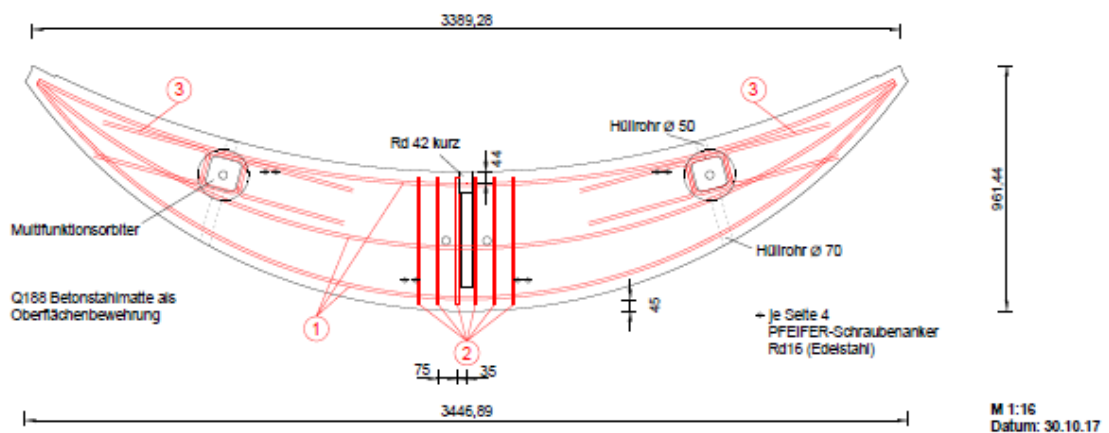
#### Antriebsbock



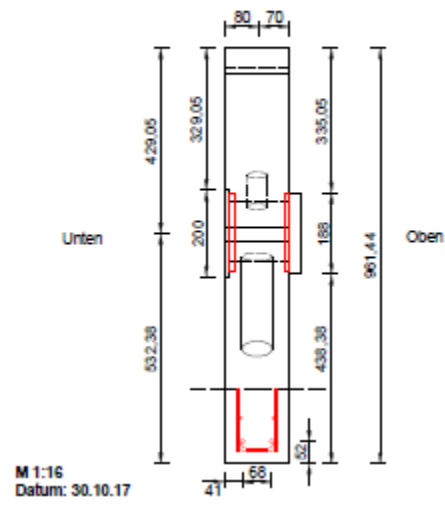
### 3.5.5. Die Sicheln

Die Sicheln werden vor dem Wenden auf die Halbschalen montiert und fest mit diesen verbunden. Sie dienen zum einen als Unterstützung beim Wenden und zum anderen stellen sie die eigentliche Auflagerung der Halbschalen auf den Abrollhügeln dar.

#### Bewehrungsplan

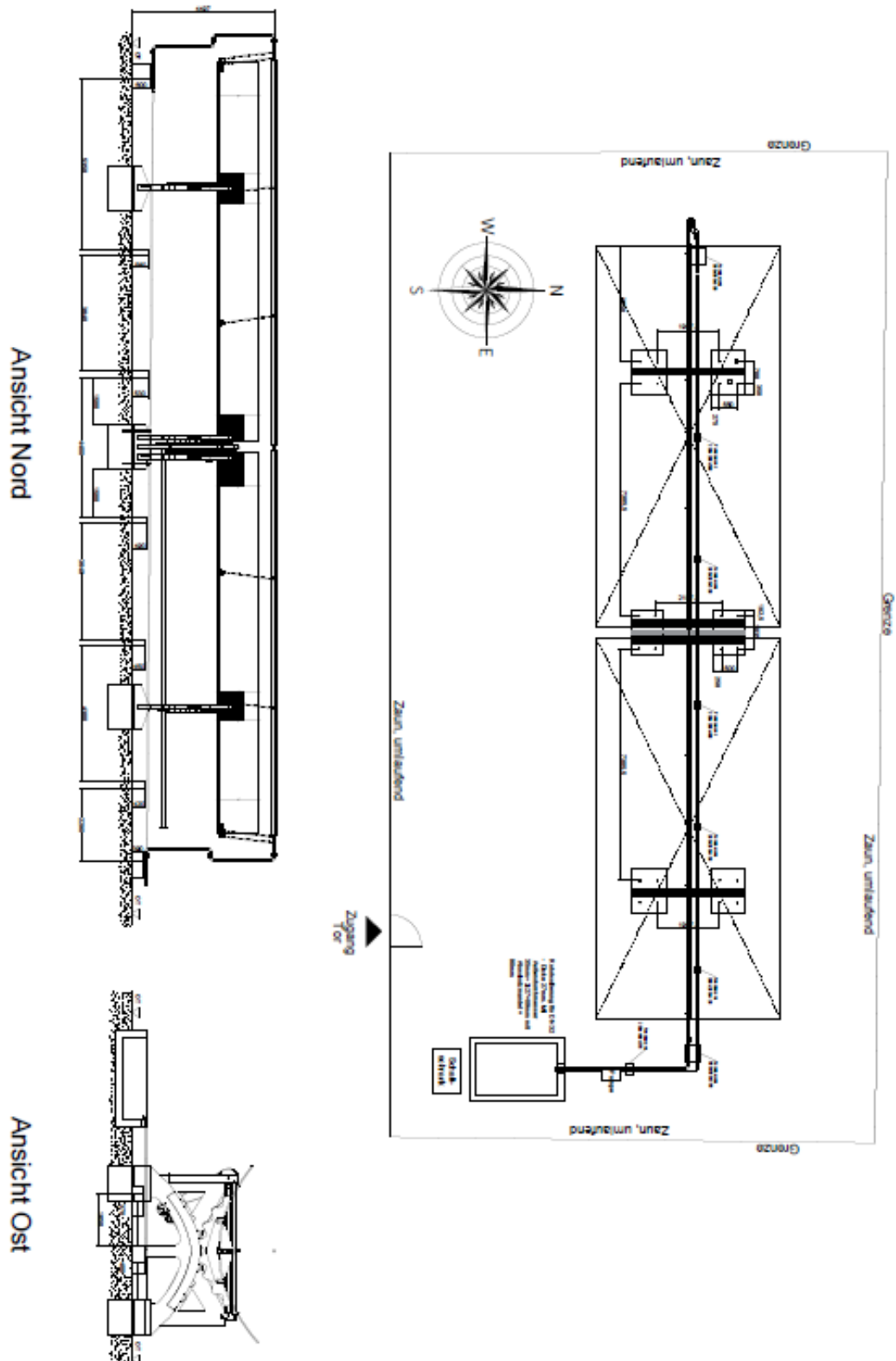


## Schnitt A- A



### 3.5.6. Die Gesamtanlage mit allen Bauteilen

Die nachfolgende Skizze stellt die gesamte Demonstratoranlage mit den zuvor erklärten einzelnen Bauteilen dar.



### **3.6. Die Lagerung in der Feldfabrik**

Zwischen der Produktion der Fertigteile und deren Montage muss zwingend ein Pufferlager aufgebaut werden, so dass die Fertigteile abschließend Aushärten und alle mit diesem Prozess einhergehende Vorgänge, insbesondere das Schwinden des Betons, abgeschlossen sind. Dieses Lager soll 30 Tagesproduktionen umfassen. Kritisch, und damit aus dem Grund näher zu betrachten, sind die Halbschalen, da sich ein Lagerbestand von 750 Fertigteilen bei einer Tageproduktion von 25 Stück aufbaut. Alle anderen Fertigteiltypen können im Freilager einfach abgelegt werden.

Laut Angabe der Fa. Solarlite ist es realistisch, dass 25 Einheiten am Tag im Feld verbaut werden können, somit müsste die Montage 30 Tage nach Produktionsbeginn starten. Das Lager würde also zunächst auf 750 Einheiten Halbschalen sowie je 1.500 Stück Sicheln und Abrollhügel aufgebaut und diese Menge konstant über den gesamten Produktionsprozess aufrecht erhalten bleiben. Nach dem Prinzip „first in – first out“ würden die Elemente dem Lager entnommen werden.

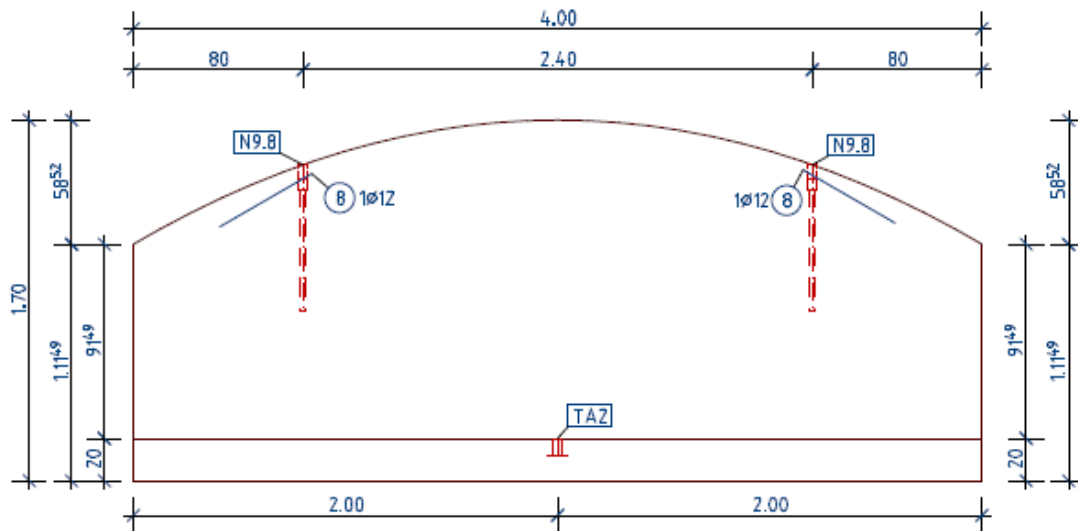
Die Abrollhügel, Antriebblöcke, Fundamente und Sicheln werden einfach auf Lagerhölzern in einem Freibereich abgelegt, hier sind keine weiteren Unterkonstruktionen zu beachten.

Problematisch ist der Flächenbedarf, den das Lager der Halbschalen einnehmen würde. Bei einer Grundfläche von 12 x 6 m je Fertigteil muss man mit mindestens 13 x 7,5 m, also aufgerundet 100 m<sup>2</sup> Lagerfläche je Teil rechnen. Das ergäbe eine Gesamtlagergröße von 75.000 m<sup>2</sup>. Für die Lagerung der Fertigteile werden weiterhin je zwei Stück Unterkonstruktionen, sogenannte Lagerböcke, benötigt, um die Halbschalen ablegen zu können. Hiervon würden 1.500 Stück benötigt. Der Flächenbedarf ist eindeutig zu groß und die Kosten für so viele Lagerböcke zu hoch.

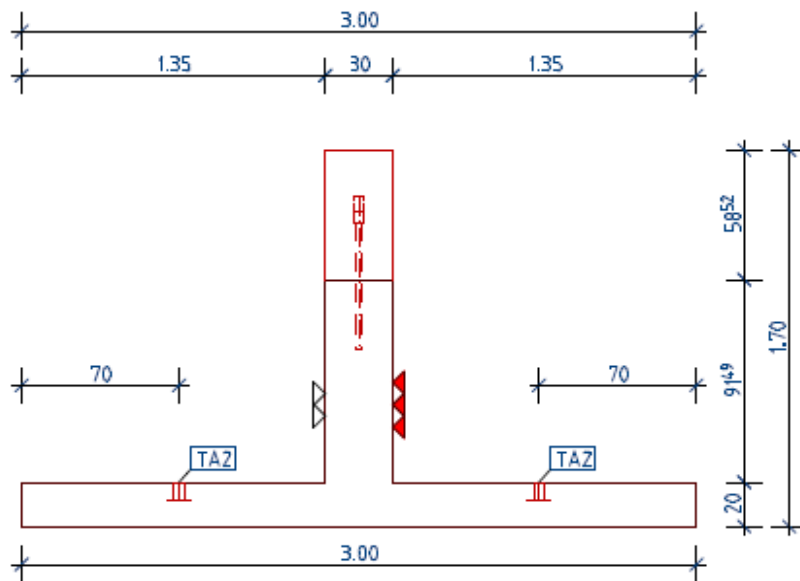
Aus dem Grund haben wir beschlossen, die Halbschalen in Ihrer liegenden Lagerungsweise fünffach zu stapeln. Damit verkleinert sich die benötigte Anzahl an Lagerböcken auf 300 Stück und die Lagerfläche auf 15.000 m<sup>2</sup>.

Die Lagerböcke wären Betonfertigteile, konstruiert wie herkömmliche Winkelmauern, deren Oberkante exakt dem inneren Profil der Parabolgeometrie folgt. Diese Fertigteile würden im Vorfeld in der Feldfabrik mit Normalbeton hergestellt werden. Nachfolgende Skizzen zeigen ein entsprechendes Element:

### INNENANSICHT (Blick in die Schalung)



### SEITENANSICHT



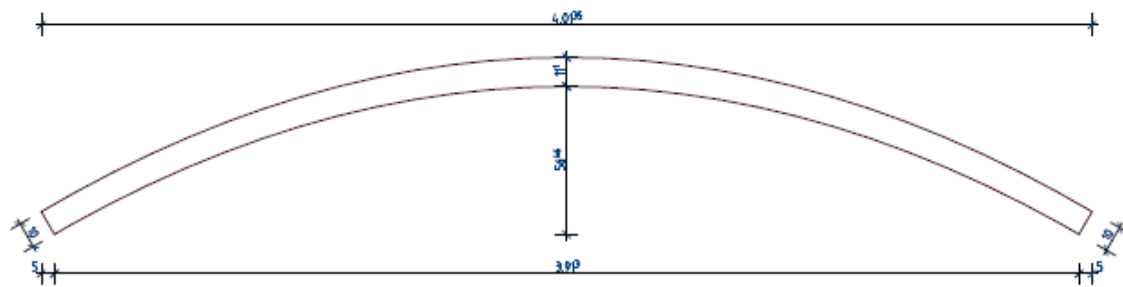
Grundsätzlich wichtig ist, dass diese Unterkonstruktionen über einen großen Fundamentfuß verfügen und auf einen entsprechenden Unterbau aus Schotter oder auf anderem tragfähigen Boden gesetzt werden. Weiterhin müssen diese Unterkonstruktionen von der Höhe her sehr exakt zueinander ausgerichtet sein.

Die Auflagerung der Fertigteile erfolgt an exakt denselben Stellen, an denen die Halbschalen im späteren fertigen Zustand gleichfalls gelagert werden. Da zum Zeitpunkt der Einlagerung nur eine gewisse Frühfestigkeit, aber noch lange keine Endfestigkeit vorhanden ist, soll die Profilierung der Unterkonstruktion entsprechend der Parabolgeometrie formstabilisierend wirken.

Nach dem Ablegen der untersten ersten Halbschale wird exakt oberhalb der Auflagerung ein Hartholz gelegt, welches ebenfalls der Halbschalengeometrie entspricht.



## Seitenansicht

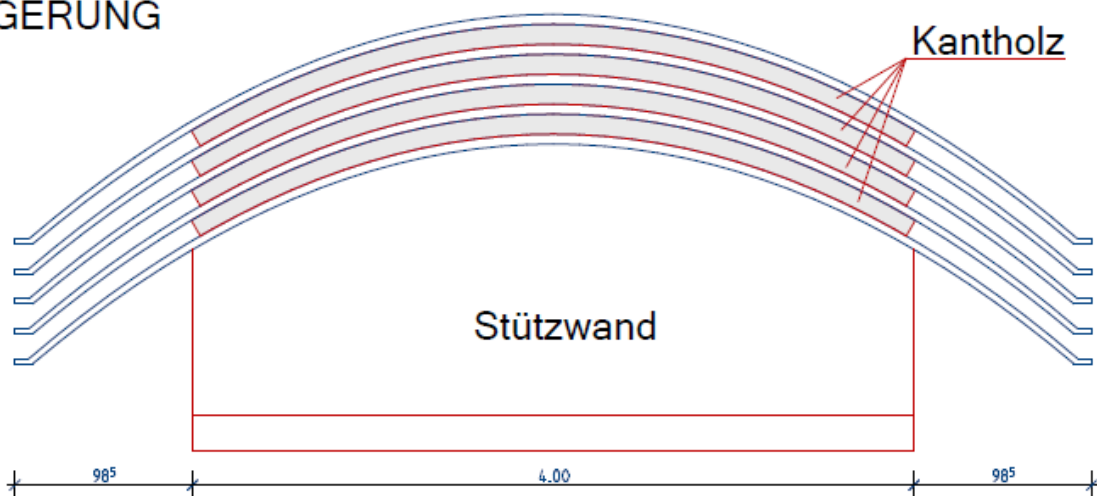


## Draufsicht



Auf diese Hölzer wird nun das nächste Fertigteil abgelegt, insgesamt bis zu 5 Stück übereinander, mit folgendem Gesamtergebnis:

## LAGERUNG



Die Last der Fertigteile wird senkrecht exakt in einer Linie über das Fundament in den Boden eingeleitet. Unterschiedliche Setzungen müssen ausgeschlossen werden, da diese zu Verformungen der fertigen Halbschalen führen würden.

### **3.7.     *Der Wendevorgang***

Nach Abschluss der Lagerungszeit und unmittelbar vor dem Bedarfszeitpunkt im Baufeld wird der jeweils älteste Stapel mit Fertigteilen einzeln entpackt, zur Wendestation transportiert und auf dieser abgelegt. Hier erfolgt zunächst das Anbringen der sichelförmigen Halbschalen an der Unterseite. Danach wird das Fertigteil direkt gewendet.

Nach dem Wenden wird das Bauteil auf ein passendes Untergestell abgelegt und dort der Spiegel appliziert. Dieser Vorgang wird in einem der anderen Arbeitspakete genau beschrieben. Das Untergestell entspricht dem Prinzip einer herkömmlichen Innenladerpalette und kann von einem entsprechenden Fahrzeug zum Transport in das Baufeld aufgesattelt werden.

Im Anschluss an das Applizieren des Spiegelmaterials wird das Bauteil ins Baufeld gefahren und dort montiert.

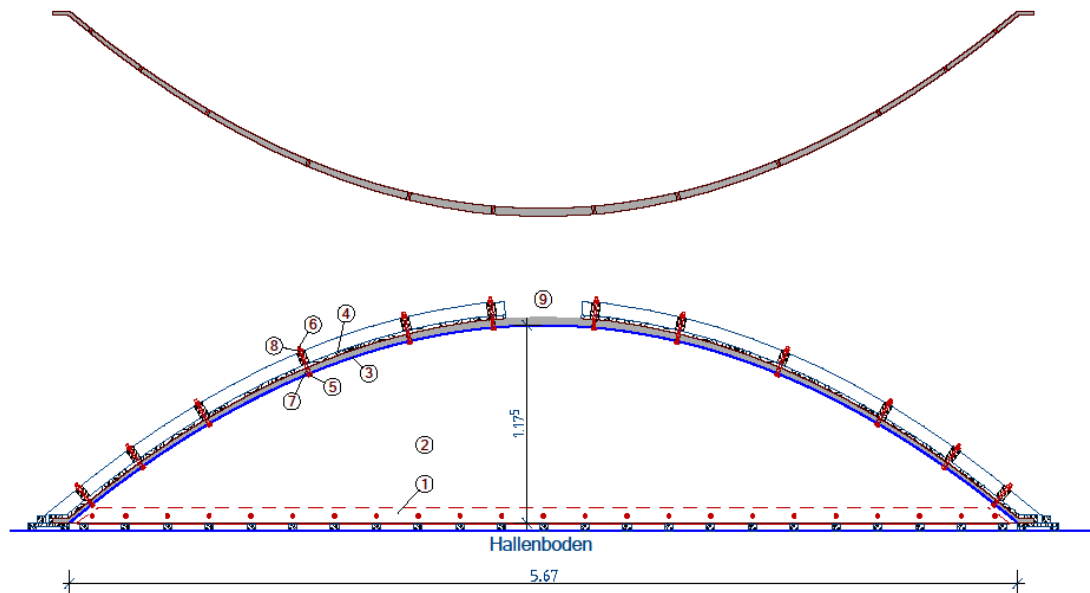
## 4. Konzeptionierung Schalungstechnik

### 4.1. Konzept Demonstratorschalung

Paderborn, 29.01.2016

Aufgrund der geringen Stückzahl an Demonstratorteilen (2 Stück) und des vorhandenen Budgets kann nicht annähernd der Schalungsaufwand betrieben werden wie es in der realen Feldfabrik getan würde. Dort wäre die Form komplett aus Stahl und hydraulisch oder elektromotorisch betrieben.

Aufgrund der Vorgabe von 5 mm Toleranz planen wir für den Demonstrator eine Kombination aus Stahl und Holz sowie eine Befüllung der Form von der Rückseite des Fertigteiltes her. Den Aufbau möchte ich im Folgenden vorstellen. Bitte beachten Sie parallel beim Lesen die Zeichnung „Konzept Demonstratorschalung“.



Diese Zeichnung haben wir auf Grundlage der vom DLR zur Verfügung gestellten Excel-Tabelle erstellt, wobei die Bauteildicke rein angenommen ist. Die Festlegung der Materialstärke ist für uns ein wesentlicher Meilenstein, der zeitnah erfolgen sollte, um mit der Konstruktion beginnen zu können.

Als Untergrund der Demonstratorschalung dient unser Hallenboden, eine 20 cm starke Faserbetonsohle, maschinell geglättet. Wir wollen uns von einem Schlosser einen Stahlrahmen **(1)** anfertigen lassen, der mittels Ausgleichblechen auf der vorhandenen Betonsohle ausnivelliert aufgedübelt wird und somit die ebene Basis der Form darstellt.

An Stahlwinkeln dieser Unterkonstruktion werden in einem noch festzulegenden Abstand CNC-gefräste Spanten aus Holz **(2)** befestigt, welche der Parabolgeometrie entsprechen.

Auf diese Spanten werden wir Stahlbleche **(3)** in noch festzulegender Stärke (ca. 1-2 mm) kleben. Diese Bleche sollen die volle Aperturweite in einem Stück haben, um keine horizontalen Schalungsstöße in der Form zu generieren. Die Breite der einzelnen Bleche ist noch nicht definiert, es werden wahrscheinlich 6-9 Stück sein.

Bis zu diesem Schritt ist die Form trotz ihrer Größe noch recht trivial. Schwierig wird es bei der zweiten Schale der Form. Diese wird aufgrund der Fließfähigkeit des Betons unbedingt benötigt. Eine Fixierung und Ausrichtung der zweiten Schale würde im Realfall über eine entsprechende Stahlform gelöst werden. Im Falle des Demonstrators kann diese Schale **(4)** nur aus Holz gebaut werden. Zwingend muss die Außenschale der notwendigen Geometrie folgen und diese halten. Sie muss zum einen gegen die Schwerkraft und zum anderen gegen den Betondruck standhalten. Um das zu gewährleisten, sehen wir nur die Möglichkeit, die Form in regelmäßigen Abständen zu durchbohren. Dies ist eventuell ein Manko, auf das später noch genauer eingegangen wird.

Die Bohrungen befinden sich auf definierten Achsen, an deren Stelle die Bauteildicke entsprechend bekannt ist, und haben regelmäßige Abstände. Die Metallplatte (Boden der Form) hat Bohrungen mit von unten befestigten Gewindetellern **(5)**. In diese Teller drehen wir Gewindestangen **(6)**, über diese wir wiederum kurze Stahlhülsen **(7)** schieben. Diese Stahlhülsen sind exakt auf Bauteildicke abgelängt. Nun montieren wir die äußere Schale **(4)**, welche sich quasi auf die Hülsen legt und sichern diese mittels Muttern außen **(8)**. Die Hülsen definieren damit den Abstand zwischen innerer und äußerer Schalung und damit die Bauteildicke. Die Außenschale ist gegenüber der Innenschalung je Seite ca. 20-25 cm kürzer, die verbleibende Öffnung **(9)** dient dem Befüllen der Form.

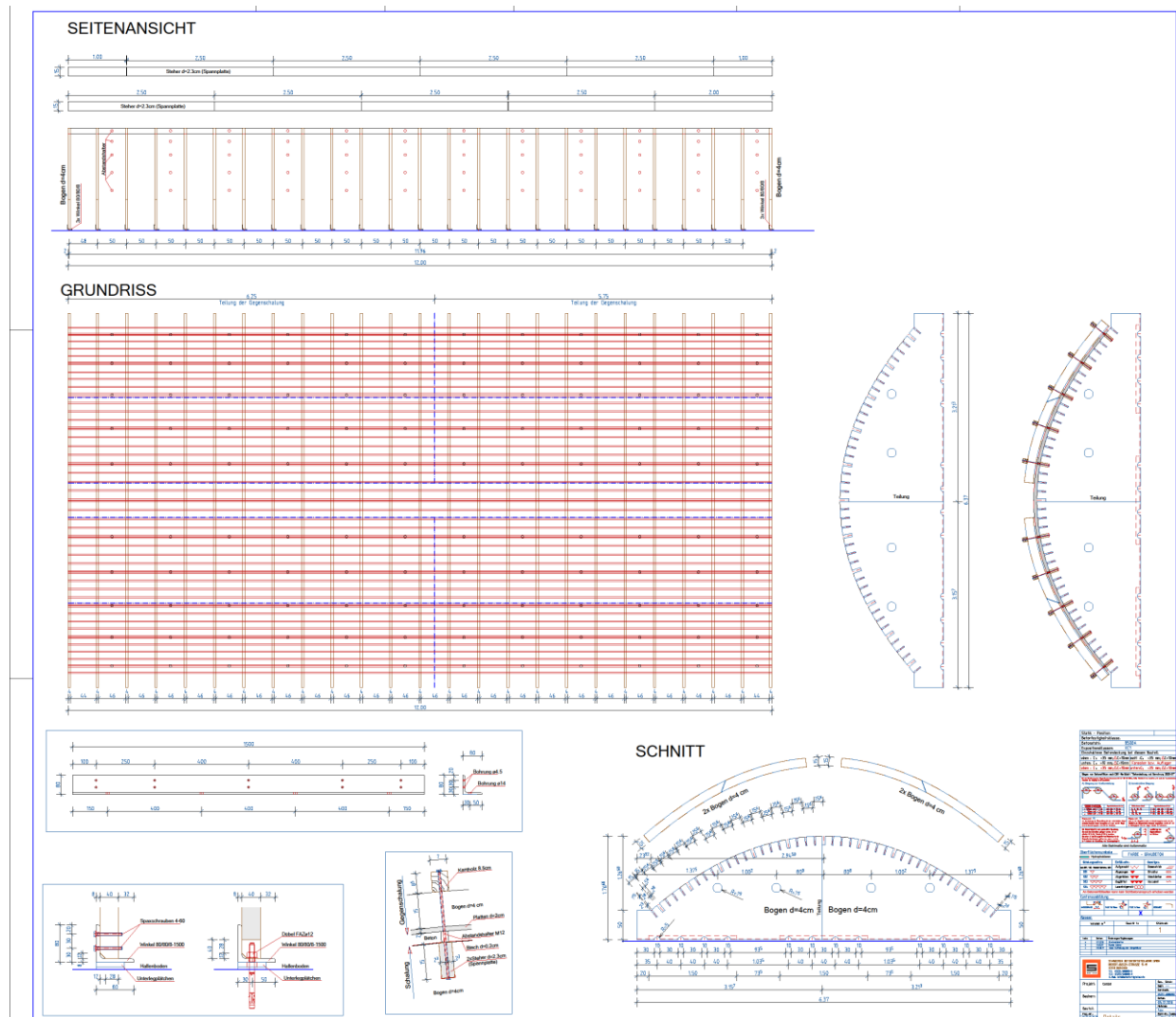
Auf diese Weise ist gewährleistet, dass die Demonstratorgeometrie formstabil hergestellt werden kann. Diese Bauweise entspricht der üblichen zweihäuptigen Schalung, z. B. bei Ortbetonwänden mit Systemschalungen, durch die immer durchgespindelt wird, um den Betondruck aufnehmen zu können. Der Nachteil besteht in den Metallrohren/Öffnungen, die im Beton verbleiben. Diese können offen bleiben oder im Nachgang mit einem Spachtelmaterial ausgefüllt werden. Für den Fall, dass das Spiegelmaterial im Nachgang auf den Beton aufgebracht wird dürften die Schalungsdurchdringungen unerheblich sein.

Sollten wir uns im Projekt für eine Bauweise entscheiden, bei der wir auf den Spiegel betonieren, wären die Durchspindelungen sicherlich störend, dennoch unvermeidlich. Wir sehen im Rahmen des zur Verfügung stehenden Budgets keine Möglichkeit, die zweite Schale (man bedenke immer die Größe der Form von 12 x 6 m) frei ohne Durchdringungen formstabil zu spannen. Der Betondruck ist schlichtweg zu groß. Der Spiegel müsste also mit durchbohrt und nachträglich an diese Stellen ausgebessert werden. Zu Demonstrationszwecken sollte das denkbar sein.

Ggf. sollte untersucht werden, ob man diese Betondurchdringungen nicht zur endgültigen Fixierung des Spiegelmaterials nutzt, quasi im gleichen System mit U-Scheibe und Mutter. Sicherlich wären damit Störstellen in der Spiegeloptik vorhanden. Fraglich ist, ob diese flächenmäßig nicht zu einer unbedeutenden Größe werden.

Sobald die Geometrie des Demonstrators unveränderlich feststeht und die Projektbeteiligten mit der beschriebenen Art des Schalungsbaus einverstanden sind, wollen wir zu Testzwecken eine vereinfachte Form des Demonstrators in reiner Holzform bauen, mit echter Apertur, allerdings nur mit einer Breite von 1,0 -1,5 m. Hierbei geht es uns nicht um sehr genaue

Maßhaltigkeit, sondern eher um Erfahrungen im Handling mit dem ultrahochfesten Beton, der Schalungsgeometrie und dem fertigen Teil zu gewinnen und ggf. Verbesserungen einzubringen.

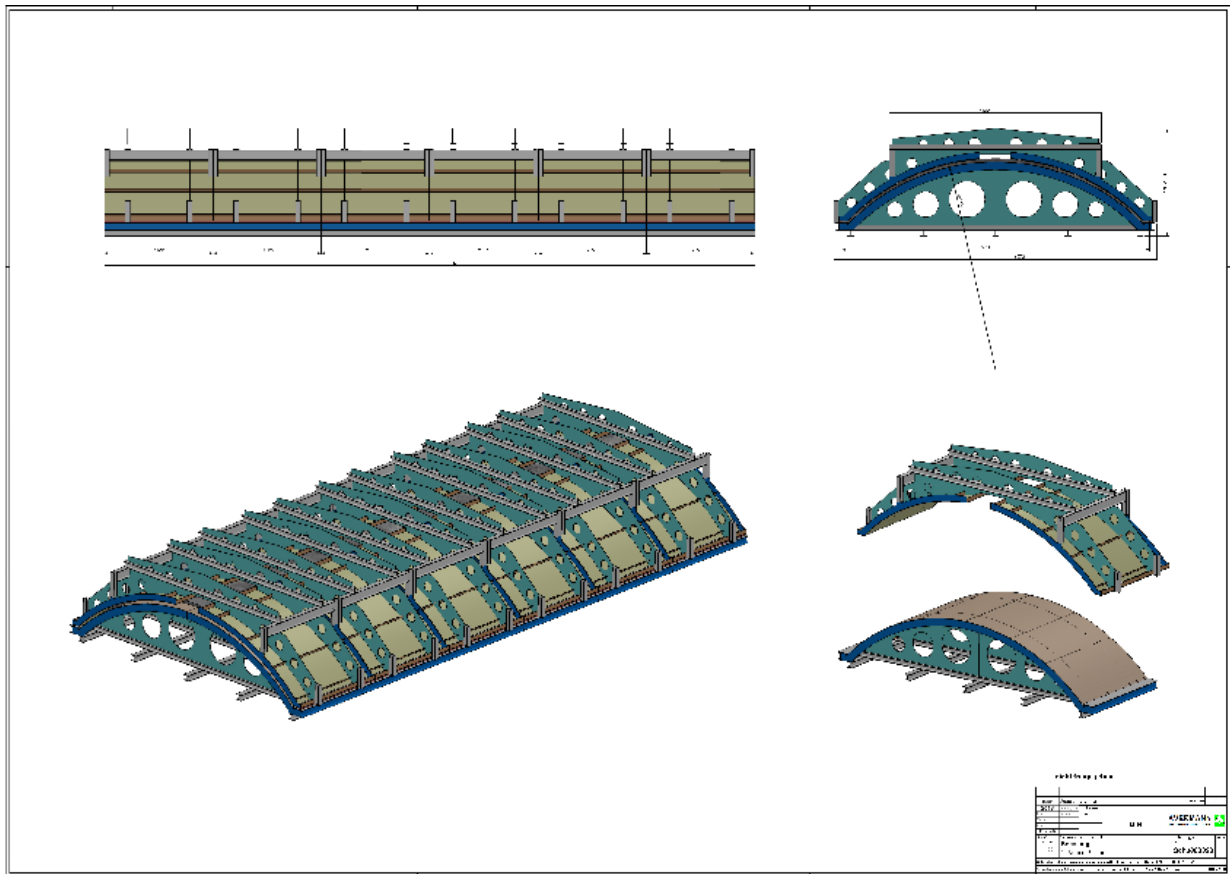


## 4.2. Konzept Realschalung in der Feldfabrik

Paderborn, 09.06.2016

Im Wesentlichen entspricht der Aufbau der realen Schalung der der Demonstrator Schalung. Der wesentliche Unterschied ist die Materialwahl. Während die Demonstrator Schalung aus Holz hergestellt wird, arbeitet man in der tatsächlichen Serienproduktion mit Stahlschalungen. Diese sind sicherlich kostenintensiv in der Anschaffung, amortisieren sich über große Stückzahlen jedoch schnell und lassen viel höhere Genauigkeit, Fertigungseinsätze, und -qualität zu. Der Formenunterbau soll stationär am Untergrund befestigt werden, während die obere Deckschalung mobil gehalten wird. Die Verbindung beider Schalungshälften erfolgt über Stecksysteme und Dorne, so dass ein schnelles maßhaltiges Verbinden der Schalungshälften möglich ist. Die Fixierung beider Hälften zueinander erfolgt dann über Schnellspannsysteme.

Nachfolgende Skizze soll einen ersten Ansatz der Stahlschalung darstellen:



## 5. Mitwirkung bei Beton- und Bewehrungstechnik

### 5.1. *Besuch bei Dyckerhoff in Wiesbaden*

Paderborn, 19.02.2016

Beim ersten Projekttreffen in Kaiserslautern wurde von den Beteiligten festgehalten, dass die Entwicklung einer speziellen Betonrezeptur für die Solarkollektoren den zeitlichen Rahmen des Projektes sprengen bzw. ausreichend Umfang für ein Folgeprojekt darstellen würde.

Es soll die gleiche Rezeptur verwendet werden, welche auch bei dem von der TU Kaiserslautern realisierten Demonstrator zum Einsatz kam. Dabei handelt es sich um einen hochfesten selbstverdichtenden Beton (UHPC), bei dem im Wesentlichen das Compound „NANO-DUR“ der Fa. Dyckerhoff zum Einsatz kommt.

Die nachfolgende Abbildung stellt die Rezeptur im Einzelnen dar:

### Rezept NANODUR

	Material	Materialkosten inkl. Transporte frei Werk	Menge in kg/m³	Menge in kg/to	Kosten in € pro m³
1	Splitt trocken	20 - 190 €/to	880	360	40,-
2	Sand trocken	7 - 60 €/to	430	174	10,-
3	Nanodur® compound	354 - 444 €/to	1050	429	386,-
4	Fließmittel ACE 430	2,00 - 2,50 €/kg	ca. 14 kg	5,8 kg	35,-
5	Schwindreduzierer	5,50 €/kg	ca. 6 kg	2,5 kg	33,-
6	Zugabewasser Gesamtwasser inkl. FM-Anteil	w/z=0,26 bis 0,27	155 ltr. 160 - 170 ltr.	63 ltr.	-
7	Summe:		2.500 kg		500,- bis 600,-
8	Kosten in €/to			1.000 kg	200,- bis 245,-

Am 15.01.2016 sind vier Mitarbeiter der Fa. Stanecker einer Einladung der Fa. Dyckerhoff gefolgt und haben an einer Mischvorführung des Nanodurs teilgenommen. Im Labor der Fa. Dyckerhoff wurde der Beton sowohl mit den Gesteinszugaben und Sand von Dyckerhoff als auch mit den Zuschlägen der Fa. Stanecker erfolgreich hergestellt. Es erfolgte eine präzise Mischanweisung. Resultierend kann festgehalten werden:

- Die Komponenten des Betons sind zwar speziell, dennoch lässt sich der Beton aufgrund der Verwendung des Compounds in nahezu jedem Betonmischer herstellen
- Der W/Z-Wert ist mit 0,27 sehr gering.
- Die Mischzeiten sind mit rund 10 Minuten je Mischung im Vergleich zu „normalem“ Beton deutlich erhöht.
- Die Verfügbarkeit des Nanodur ist auch in Nordafrika möglich. In dem Fall würden nur die Compoundanteile des NANODUR in Deutschland hergestellt und ins Zielgebiet transportiert werden. Zement sowie andere Zuschläge würden in einem lokalen Zementwerk beigemischt, so dass der Frachtkostenanteil erheblich reduziert würde.





Bild: Mitarbeiter der Fa. Stanecker sowie Laborpersonal von Dyckerhoff im Labor in Wiesbaden betrachten die erste Mischung des Nanodur. Das Ausbreitmaß bei einem WZ-Wert von 0,27 ist beeindruckend.

Dyckerhoff selbst geht in der Mischanleitung von Basalt als Gesteinszugabe aus und minimiert das Größtkorn auf 5 mm. Basalt, ein recht hartes Gestein, ist jedoch nicht in jeder Region der Erde gleichverteilt vorhanden. Zudem ist eine Sieblinie mit max. 5mm Größtkorn tendenziell teurer in der Anschaffung. Ziel der Untersuchung in diesem Projekt soll es sein, möglichst herkömmliche Zuschläge zu verwenden sowie möglichst kostensenkend zu arbeiten. Aus dem Grund wurde die Rezeptur auf die herkömmlichen Ressourcen der Fa. Stanecker umgestellt. Wir verwenden Kalksteinsplitt als Gestein und setzen die Kornverteilung 2-8 mm ein.

Während der Mischvorführung wurden Proben genommen, die im Nachgang durch das Labor der Fa. Dyckerhoff untersucht wurden. Es handelt sich dabei um die Herstellung des Nanodur mit den Gesteins- und Sandzuschlägen der Fa. Stanecker:



# Dyckerhoff AG WDI

## Prüfprotokoll

Auftragsnummer 16-00026

Datum 12.02.2016

Druck und Biegezug

DIN EN 196

Prüfkörper : *Prisma*

40x40x160

Serie Bezeichnung : V2

Prüfer :

Herstelldatum : 15.01.2016 / 00:00

Probenaalter : 28 Tage 00:00

Prüfdatum : 12.02.2016 / 08:46

Bemerkungen :

Bezeichnung	Abmessungen [mm]			Masse [g]	Rohd. [kg/m³]	Biegezug		Druck			
	h	b	l			[kN]	[N/mm²]	[kN]		[N/mm²]	
1	40,0	40,0	160,0	623,8	2437	7,307	17,1	220,34	224,49	137,7	140,3
2	40,0	40,0	160,0	617,6	2413	7,347	17,2	232,20	233,20	145,1	145,8
3	40,0	40,0	160,0	613,5	2396	6,981	16,4	209,80	238,30	131,1	148,9
4	40,0	40,0	160,0	620,1	2422	8,572	20,1	222,62	221,93	139,1	138,7
5	40,0	40,0	160,0	635,9	2484	8,296	19,4	217,11	218,40	135,9	136,5
6	40,0	40,0	160,0	618,1	2414	7,718	18,1	223,26	228,82	139,5	143,0
7	40,0	40,0	160,0	630,5	2463	8,480	19,9	222,67	217,06	139,2	135,7
8	40,0	40,0	160,0	637,1	2489	7,702	18,1	221,89	219,51	138,7	137,2
9	40,0	40,0	160,0	617,1	2411	7,298	17,1	219,20	222,77	137,0	139,2
Mittelwert					2436,5		18,2				139,4
Standardabw.					33,9		1,4				4,2

\* : Einzelwerte verworfen

Güteprüfung nicht möglich

Zu den Ergebnissen ist zu sagen, dass sowohl sich die Druckfestigkeit mit im Mittel rund **140 N/mm²** und die Biegezugfestigkeit mit im Mittel rund **18 N/mm²** sehr positiv darstellen. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Nanodurbeton mit den genannten Zuschlägen der Fa. Stanecker bei der Herstellung der beiden Demonstratoren verwendet wird.

## 5.2. *Herstellung des Nanodur im eigenen Werk*

Paderborn, 29.03.2016

Nach einigen Vorversuchen haben wir am 29.03.2016 erstmalig Nanodur in reeller Chargengröße in unserem werksseitigen Betonmischer erfolgreich produziert. Entsprechend der Mischanweisung der Fa. Dyckerhoff sowie mit den wichtigen Erkenntnissen, die der Besuch bei Dyckerhoff in Wiesbaden mit sich gebracht hat, ist die durchaus schwierige Produktion dieses speziellen Betons auf Anhieb gelungen.

Produziert wurden zwei unbewehrte Fertigteilplatten mit den Abmessungen 200 x 100 x 3 cm sowie Prüfkörper für die RUB sowie für das eigene Labor.



Bild: Einfüllen der ersten Nanodurproduktion in eine Musterform.

Die Prüfkörper wurden anschließend am 06.04.2016 in Bochum zur Prüfung übergeben worden sind. Folgende Ergebnisse sind uns daraufhin von Herrn Przondziono von der RUB übermittelt worden:

Probe-Nr.:	Bruchlast	Druckfestigkeit	E-Modul
	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	2.192	124,3	52.775
2	2.197	124,5	52.887
3	2.177	123,4	52.399
<b>Mittelwert</b>	<b>2.189</b>	<b>124,1</b>	<b>52.687</b>

Diese Ergebnisse sind zufriedenstellend, wobei an der Oberfläche sowohl im Labor als auch bei der Werksfertigung eine leichte Entmischung an der Betoneinfüllseite zu beobachten war. Dieser Entmischung soll durch Reduzierung der Fließmittelzugabe entgegengewirkt werden. Dazu werden an der RUB weitere Versuche gefahren.

### **5.3. Herstellung von Testsegmenten für Auszugversuche**

Die Fa. Pfeifer hat Einbauteile mit Innengewinde (sogenannte „Orbiter“) entwickelt, die zum Anschlagen und Transportieren der Fertigteilhalbschalen dienen sollen.

Am 16.11.2016 wurden dazu 24 Fertigteile der Größe 1 x 1 m und einer Dicke von 43 mm hergestellt. Die Dicke entspricht genau der Bauteildicke der fertigen Halbschale am Lastangriffspunkt. Es wurden jeweils 4 verschiedene Ausgangszustände eingeschalt, also je 6 gleiche Versuchskörper.

Versuch 1: mit hoher Zulagebewehrung und Matte

Versuch 2: mit mittlerer Zulagebewehrung und Matte

Versuch 3: nur mit Mattenbewehrung

Versuch 4: ohne Bewehrung

Betont wurden die einzelnen Platten zwischen 5 und 7 Uhr morgens. Parallel wurden insgesamt 12 Probewürfel hergestellt. Nach der Betonage wurde der gesamte Versuchsaufbau eingehaust und von außen Wärme zugeführt. Nach 9 Stunden wurde mit Auszugversuchen an den Orbitern begonnen, und zwar von jeweils 2 Teilen je Gruppe. Die jeweils restlichen Proben je Gruppe wurden nach 24 Stunden untersucht. Die Ergebnisse werden von der Fa. Pfeifer dargestellt.

Die Druckfestigkeiten des Betons lagen nach 9 Stunden und Wärmezufuhr bei ca. 60 N/mm<sup>2</sup>, nach 24 Stunden ohne weitere Wärmezufuhr bei ca. 80 N/mm<sup>2</sup>.





Bild: fertig geschalte und bewehrte Testplatten kurz vor der Betonage



Bild: betonierte Testplatten





Bild: betonierte Testplatten wurden eingehaust und haben unter ständiger Wärmezufuhr abgebunden



Bild: Auszugsversuche an abgebundenen Platten nach 9 Stunden

## 6. Realisierung Demonstrator

### 6.1. *Erwirkung einer Baugenehmigung*

Paderborn, 17.05.2017

Unsere telefonische Anfrage an die baugenehmigende Behörde des Kreises Paderborn hat ergeben, dass der Demonstrator, auch wenn es sich um eine temporäre Testanlage handelt, im rechtlichen Sinn eine bauliche Anlage darstellt und es damit einer Baugenehmigung bedarf.

Wir haben daraufhin kurzerhand ein Architekturbüro mit der Erstellung des Bauantrages beauftragt, welcher am 10.02.2017 fertiggestellt wurde. Aufgrund des nicht alltäglichen Vorhabens und zum besseren Verständnis auf Seiten der Genehmigungsbehörde fand die Abgabe des Bauantrages während eines persönlichen Termines im technischen Rathaus statt.

Mit Schreiben vom 05.04.2017 hat uns der Kreis Paderborn unter Aktenzeichen 443-17-30 die Baugenehmigung für die „**temporäre Errichtung von zwei Parabolspiegeln mit Einfriedung befristet für 5 Jahre**“ erteilt.

### 6.2. *Herstellung eines 1,5 m breiten Testmodules*

Paderborn, 16.06.2017

Nachdem die technischen Vorarbeiten und Rahmenbedingungen im Projekt festgelegt waren, konnte mit der Realisierung der Demonstratormodule begonnen werden. Dazu haben wir im Projektteam beschlossen, nicht gleich ein komplettes 12 m langes Modul herzustellen, sondern zu Testzwecken zunächst mit einem Teilsegment zu beginnen. Dieses wurde bei realem Querschnitt aufgrund der vorhandenen Schalblechbreiten auf eine Breite von 1,50 m definiert. Sinn und Zweck war, am kleinen Element die eigentliche Betonage zu simulieren, Erfahrungen zu sammeln und mögliche Verbesserungen in den Schalungs- und Produktionsprozess für die spätere Hauptbetonage noch einfließen lassen zu können. Vorweg sei gesagt, dass diese Entscheidung richtig und wichtig war. Wir konnten über die verschiedenen Arbeitspakete hinweg einige Schwierigkeiten und Probleme erkennen und abstellen und wichtige Erkenntnisse für den Bau des Demonstrators sammeln.



Bild: Demonstratorschalung mit einer Breite von 1,50 m kurz vor der Betonage

Am 15.05.2017 fand die (erste) Betonage des Testsegmentes statt und endete in einem Misserfolg. Wir haben den Beton nach der vorhandenen Rezeptur der Fa. Dyckerhoff hergestellt und mussten erkennen, dass diese Mischungen aufgrund der Bewehrung zu stark am Fließen in der Form gehindert wurde. Die Bewehrung, deren Notwendigkeit sich im Projektverlauf überhaupt erst ergeben hatte, reduzierte das Ausbreitmaß des Betons erheblich und wirkte wie eine Barriere. Der Beton floss nicht vollständig und gleichmäßig entlang der Schalungsgeometrie, sondern wurde von der eingelegten Bewehrung nicht nur gebremst, sondern teilweise sogar regelrecht gestoppt. Damit war es unmöglich, ein intaktes Betongefüge herzustellen. Uns war klar, dass dieses Betonfertigteile untauglich werden würde und wir haben den Betonvorgang abgebrochen. Nach Beseitigung des Schadens und erneutem Einschalen sowie Erstellen der Bewehrung war für den 19.05.2017 die zweite Betonage angesetzt. Im Vorfeld haben wir die Problematik mit unserem Betonlaboranten sowie Mitarbeitern der Fa. Dyckerhoff diskutiert und beschlossen, die Fließmittelzugabe im Rahmen der zulässigen Bandbreite zu erhöhen, um die Fließfähigkeit des Betons deutlich zu erhöhen. Diese Maßnahme hat sich als richtig herausgestellt, die zweite Betonage war erfolgreich.

Nach Entfernen der Deckschalung am 22.05.2017 haben wir direkt die von der Universität Kaiserslautern hergestellten und zu uns gelieferten Sichel aufgelegt und mussten feststellen, dass beide Geometrien (unsere Unterseite der Halbschale zu der Oberfläche der Sichel) nicht exakt zueinander passten. Wir haben genaue Vermessungen vorgenommen und deren Ergebnisse zur Verbesserung der Schalung der Sichel nach Kaiserslautern zurückgemeldet. Parallel haben wir die Sichel so nachbearbeitet, dass sie maßlich passten und auf der



Halbschale montiert. Die Befestigung erfolgt mittels vollflächiger Verklebung sowie Verschrauben mittels zwei Gewindeankern in entsprechend positionierte Orbiter in der Halbschale.

Parallel ist uns eine weitere Problematik aufgefallen: an beiden Enden des Testsegmentes hat sich der Beton durch Schwinden und damit verbundene Eigenspannungen vom Querschnitt her verändert. Das nachfolgende Foto zeigt deutlich, dass die Unterkante des Beton, die vormals beim Guss und bis zum Ausschalen zwangsläufig bündig mit der Randabschalung war, nun bis zu 10 mm gegenüber der Randschalung höher stand.



Bild: Oberfläche des Betons steht vor dem Entschalen 10 mm über der Schalung

Das bedeutet, dass sich die Parabelgeometrie verändert hat, was für den geplanten Fokalkpunkt eine negative Entwicklung ist. Im Vorfeld wurde die Thematik „Schwinden“ während eines Projektmeetings diskutiert. Wir haben erörtert, ob wir die Parabelgeometrie bewusst überhöhen sollen, um diesem Effekt entgegenzuwirken. Zu dem Zeitpunkt haben wir uns gemeinsam dagegen entschieden. Im Falle der Realisierung der Feldfabrik ist es zwingend notwendig, Kriechen und Schwinden genau zu untersuchen oder zu messen und schalungstechnisch mit einer entsprechenden Überhöhung zu arbeiten.

Während eines Telefonates mit Herrn Breitenbücher von der RUB wurde die Erklärung gefunden, dass das Entfernen der Deckschalung bei gleichzeitigem Belassen des Fertigteiles in der Form dazu geführt hat, dass eine Austrocknung an der Unterseite des Elementes möglich war, während die Oberfläche des Betonteiles, die in der Schalung lag, nicht austrocknen konnte. So war einseitiges Schwinden gegeben, das zu den aufgetretenen Spannungen geführt hat. Für die Herstellung der Demonstratorelemente haben wir daraus die Erkenntnis gewonnen, dass wir diese zunächst länger in der geschlossenen Form belassen



und dann direkt entschalen werden. Somit können beide Oberflächen gleichzeitig austrocknen. Parallel wird aktuell die Betonrezeptur diskutiert und über eine Erhöhung des Schwindreduzierers nachgedacht.

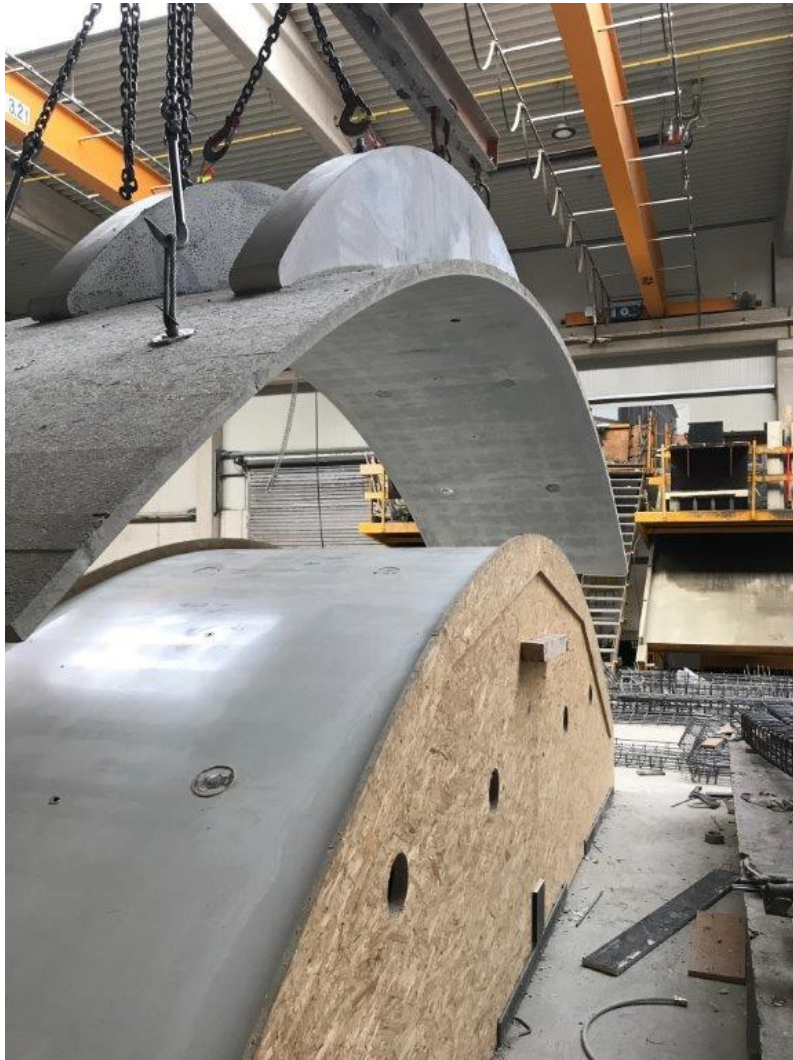


Bild: das entschaltete Demonstratorsegment hängt im Kran über der Form

Nach Trocknung des Klebers zwischen Sichel und Halbschale wurde das Element abgehoben, gedreht und zwischengelagert. Die herzustellenden Demonstratormodule werden bei gleichem Querschnitt 8x (= 12 Meter) länger sein. Das ist eine durchaus respektable und bemerkenswerte Größenordnung!



Bild: das entschaltete und gedrehte Demonstratorsegment hängt im Kran, die Form im Hintergrund

Während des Formenbaus haben wir die beiden Seiten der Schalung leicht unterschiedlich gestaltet, um abschätzen zu können, wie stark der Druck des an sich sehr dünnwandigen Betons ist und wie stark die Unterkonstruktion der Schalung zu sein hat. Dazu haben wir auf einer Seite die Querlatten in der Unterkonstruktion bewusst fehlen lassen.

Ohne Vermessungen bereits mit bloßem Auge konnten wir feststellen, dass wir auf beiden Seiten des Testsegmentes Abweichungen von der Idealparabolgeometrie hergestellt haben. Besonders auffällig sind die Verformungen in dem Bereich, wo wir keine Querlattung eingebaut haben. Zudem hat zu starkes Verschrauben der Abstandhalter in der Form dazu geführt, dass wir die Schalungsbleche verwölbt haben. Die Auflast des Betons in der Form hat diese Verwölbungen nicht wieder ausgeglichen. Genau dafür, um derartige Erkenntnisse zu gewinnen, war diese Testbetonage da. Folgende Verbesserungen für die Schalung der Demonstratormodule haben wir uns im Anschluss überlegt:

- konsequenter Einsatz der Querlattung in der Unterkonstruktion, sogar zusätzlich Verkleinerung des Abstandes der Latten zueinander, also Erhöhung der Anzahl der Querlattung
- Erhöhung der Zahl der Abstandhalter von 8 auf 10 Stück je Achse
- Nur noch handfeste Verschraubung der Abstandhalter, um keine negative Verwölbung mehr zu erzielen
- Zusätzlich werden wir die Schalungsbleche vollflächig auf der Unterkonstruktion verkleben

Am 06. und 07.06.2017 haben sind mehrere Projektteilnehmer in unserem Hause eingefunden. Zwei Partner vom DLR haben am ersten Tag das Testsegment fotogrammetrisch vermessen. Die Ergebnisse werden in dem entsprechenden Arbeitspaket dargestellt. Im Anschluss erfolgte das Aufbringen des Spiegelmaterials.



Bild: mehrere Projektteilnehmer beim Verkleben des Spiegelmaterials auf dem Testsegment

Das angedachte Konzept hat sich gut bewährt, die Verklebung hat hervorragend funktioniert und wir wissen nun, dass das Aufbringen des Spiegelmaterials bei den beiden Demonstratormodulen funktionieren wird.





Bild: das fertige, mit dem Spiegelmaterial verklebte Testsegment

Zusammenfassend stellen wir fest, dass wir durchaus sehr wichtige Erkenntnisse bei der Herstellung und der weiteren Bearbeitung des Testsegmentes gewinnen konnten und wir mit deutlichen Verbesserungen in die Produktion der realen Demonstratormodule einsteigen werden.

### 6.3. *Herstellung der beiden 12 m Demonstratormodule*

Im Juli 2017 haben wir mit dem Aufbau der eigentlichen Demonstratorform begonnen. Die Vorgehensweise entspricht dem zuvor beschriebenen Schalungsaufbau unter Einfluss der Erkenntnisse aus dem Testsegment.

Im Folgenden soll eine Bilderserie den Schalungsbau dokumentieren und erklären:



Bild: die fertig erstellte formgebende Unterkonstruktion als Traggerüst für den Beton

Die Unterkonstruktion besteht aus mittels CNC-gefrästen und der Parabolgeometrie entsprechenden Querspanten, die im Abstand von 44 cm auf einer nivellierten Stahlwinkelkonstruktion montiert wurden. Die Spanten sind mit einer Vielzahl an Querlatten ausgefacht.

Das nachfolgende Bild zeigt, dass die ersten Schalungsbleche aufgebracht wurden. Klar erkennbar ist, dass auf jeder Querspante und den Latten ein Kleber aufgebracht wurde.





Bild: die Unterkonstruktion mit den ersten Blechen, welche aufgeklebt wurden



Bild: die fertige Unterschale

Mittlerweile wurden sämtliche Bleche montiert und befestigt. Als nächstes erfolgte das genaue Einmessen der Abstandhalter. Aufwendig muss die Schalung an diesen Stellen durchbohrt werden.



Bild: die fertige Unterschale mit den eingemessenen Abstandhaltern

Die Edelstahlabstandhalter der Deckschalung sind eingemessen und befestigt. Auf der linken Schalungshälfte ist bereits die Deckschalung montiert, die ebenfalls passend durchbohrt werden muss.

Die Abstandhalter sind jeweils 5 verschieden lange massive Edelstahlwellen, welche mit einem durchgehenden Innengewinde versehen sind. Sie entsprechen in ihrer Länge exakt der Betonschalenstärke an der jeweiligen Position. Nach unten sind die Abstandhalter mit einer Gewindestange an der Unterkonstruktion befestigt. Die Deckschalung wird auf den Abstandhaltern abgelegt und definiert damit die Schalenstärke. Der später einzubringende Beton übt nicht nur Druck nach unten aus, sondern würde auch die Deckschale nach oben hochdrücken. Aus dem Grund wird die Deckschale ebenfalls mit Gewindestangen an den Abstandhaltern befestigt. Somit wird eine druck- und zugfeste Konstruktion erstellt, die den Beton in ihre Form bringen soll.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde die Bewehrung erstellt und in die Form gelegt. Gemäß Vorgabe wurde diese mit 10 mm Abstand zur Schalungsebene, der späteren Spiegeloberfläche, verlegt.





Bild: die Bewehrung in der Form

Parallel wurde auf dem Lagerplatz die Lagerfläche als „Parkposition“ vorbereitet:



Bild: die vorbereitete Lagerposition





Bild: die fertige Form

Mit dem Aufbringen der Deckschalung und deren Verschraubung war die Form fertig, im Anschluss erfolgte die Betonage:



Bild: der erste Beton wird eingebracht

Während dieser ersten Betonage, die am 29.08.2017 stattfand, stellt sich leider heraus, dass die Deckschale zu schwach gebaut worden ist. Die Idee, die gesamte Konstruktion über die innenliegenden Abstandhalter auszusteifen, hat gut funktioniert. Jedoch war der Druck, den der Beton auf die Deckschale ausübte, deutlich größer als angenommen. Die Schale hat sich zwischen den Abstandhalterachsen stark verformt und ausgebeult und hat damit zu unerwünschten Wellen und Versätzen an der Schalenunterseite geführt.

Insgesamt war die Betonage mit Ausnahme der unzureichenden Deckschale erfolgreich. Das Fertigteil wurde circa eine Woche samt Deckschale in der Form belassen. Dann erfolgte das Ausschalen und das unmittelbare Abheben der Halbschale, um folgend der Erkenntnis aus dem Testsegment eine gleichzeitige Austrocknung beider Schalenseiten zu gewährleisten. Das Abheben der Halbschale aus der Form war entgegen aller Befürchtungen unkritisch. Die Adhäsion (Vakuum, welches sich zwischen Beton und Schalungsunterseite aufbaut), war kein problematischer Zustand. Die entschaltete Halbschale wurde auf den vorbereiteten Lagerböcken abgelegt. Die Qualität der Halbschale an der Formunterseite, der späteren Spiegeloberfläche, ist hervorragend.

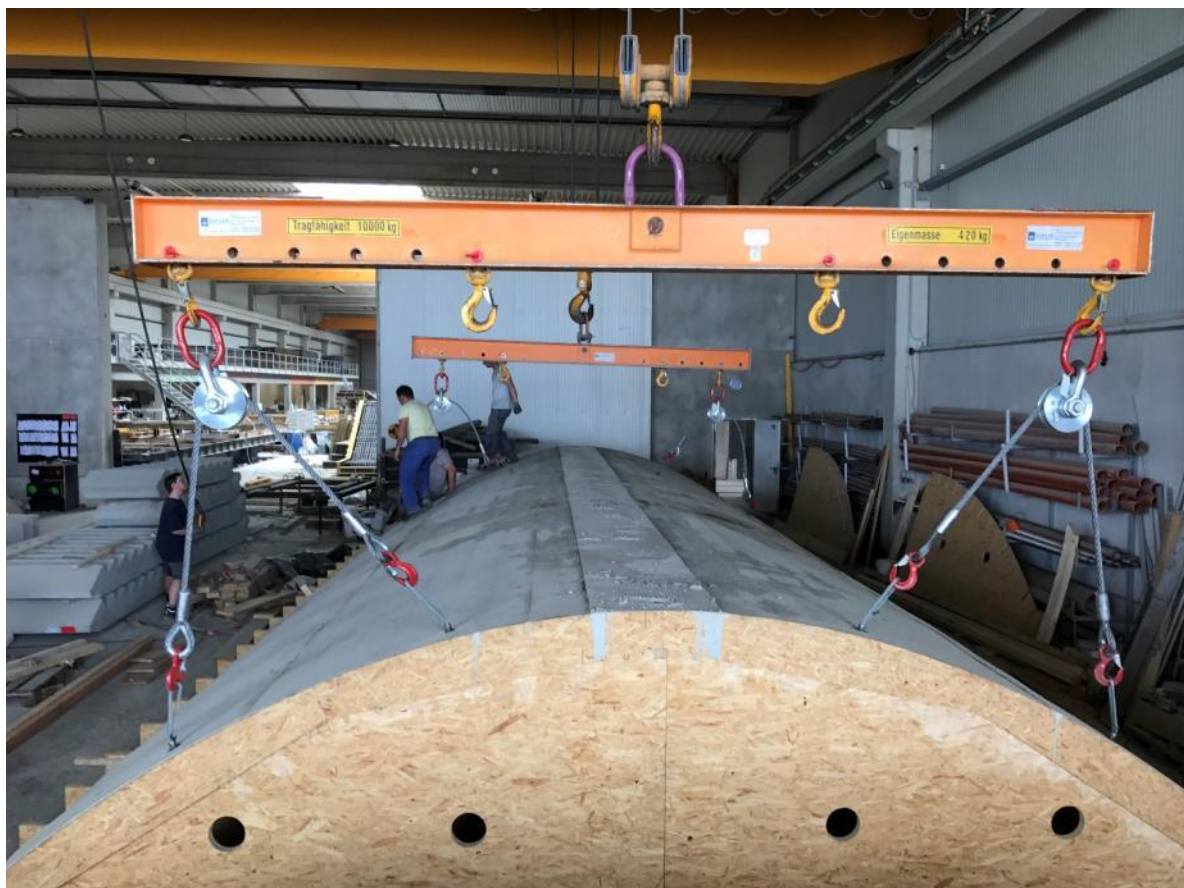


Bild: die Deckschale wurde entfernt, das Fertigteil ist zum Abheben bereits angeschlagen





Bild: die über der Form „schwebende“ Habschale



Bild: die „Wellen“ an der Halbschalenunterseite, die durch ungewollte Verformung der Deckschale entstanden sind



Bild: die im Lager abgelegte Halbschale

Direkt im Anschluss erfolgten die ersten Schritte der Arbeiten für die zweite Halbschale. Da es sich hierbei um die gleichen Prozesse und Arbeitsabläufe handelt, soll nicht weiter auf die einzelnen Schritte eingegangen werden. Die Betonage der zweiten Halbschale fand am 15.11.2017 statt.

Wesentlich verändert wurde natürlich die Deckschale. Zum einen wurde eine widerstandsfähigere Schalungsplatte eingesetzt und dazu noch die Anzahl der Querspanten der Deckschale verdoppelt. Diese Maßnahmen waren erfolgreich, die Deckschale hat ihre Funktion bei der zweiten Produktion gut ausgeübt.

Die zweite Betonage hat insgesamt hervorragend funktioniert. Mit der Herstellung der beiden Halbschalen ist der wesentliche Teil unserer Projektaufgaben erfolgreich abgeschlossen. Wir können resümieren, dass die Herstellung derart großer und dünnwandiger Betonfertigteilhalschalen möglich ist.

Die Weiterführung der Arbeiten wurde nun zunächst unterbrochen, da die Projektpartner aus Kaiserslautern noch nicht so weit mit den Teilen der Unterbauten und Sichern so weit waren.





Bild: die zweite Halbschale nach de Entschalen auf dem Weg zur Lagerposition



Bild: beide Halbschalen fertig im Lager

## 6.4. Wenden der Demonstratormodule

Grundvoraussetzung für das Wenden ist die Montage der Sichel, welche an der TU Kaiserslautern hergestellt und dann zu uns nach Borchten geliefert worden sind. Die Sichel wurden von uns auf den Unterseiten der Halbschalen montiert. Dazu haben wir uns der Hilfe eines örtlichen Vermessers bedient, mit Hilfe dessen die exakte Positionierung sichergestellt werden konnte. Die Verbindung der Sichel an den Halbschalen erfolgte über die dafür vorgesehenen Verschraubungen sowie vollflächiger Verklebung.



Bild: beide Halbschalen mit montierten Sichel. Im Hintergrund ist die „Schubkarre“ erkennbar

Für den Wendevorgang hat sich unser Projektpartner Fa. Pfeifer folgende Vorgehensweise überlegt (Text von Fa. Pfeifer):

### ■ Auslegung und Konstruktion Wendevorrichtung für die Schalen

Die spezielle Wendevorrichtung wurde notwendig, um die empfindlichen Schalen sicher um 180° zu wenden: Von der Position (180°), wie sie aus der Schalung kommen, in die Position (0°), wie sie auf den Abrollhügeln liegen. Ideengeber ist hier die Funktion einer Schubkarre,

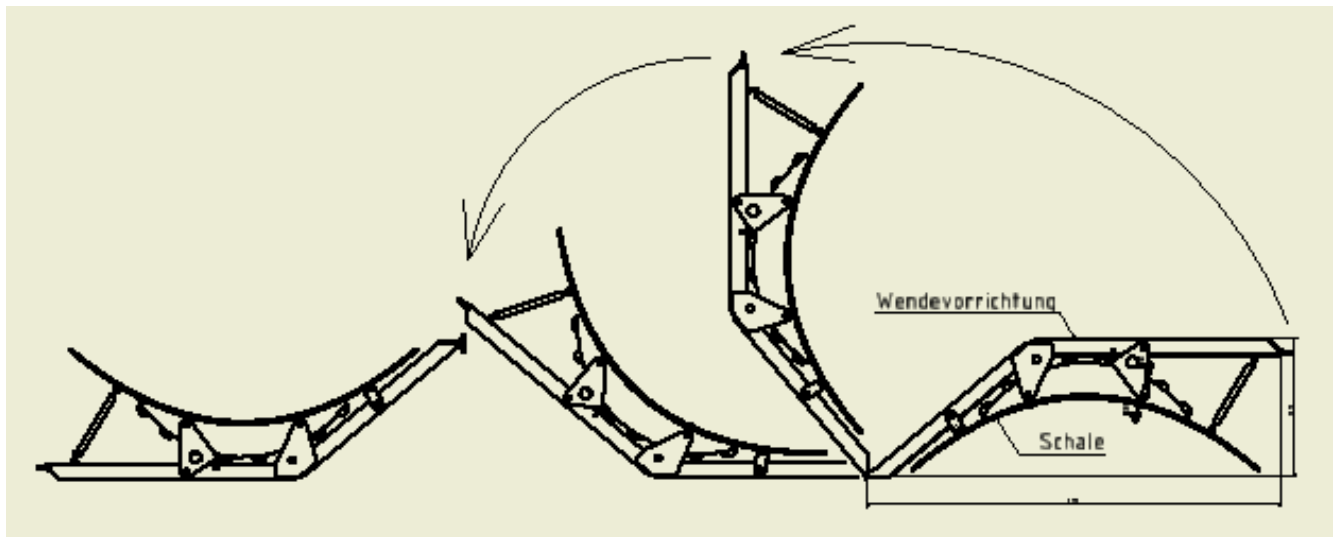
die an den beiden Griffen die Last durch günstige Hebelverhältnisse um das Rad rotatorisch anzuheben vermag. Hier ist über die Schale die Wendevorrichtung mit dem Projektnamen Schubkarre angebracht und steht einseitig über die Schale über, um sich am Boden abzustützen (wie Schubkarrenrad). Auf der anderen Seite stehen die Schubkarrengriffe über, um mit dem Kran anheben zu können. Die Verbindung zur Schale wie Schubkarrenwanne erfolgt mittels Verschraubungen an den Betonsicheln der Schale.

Die Wendevorrichtung Schubkarre wird mit dem Kran auf der Schale positioniert und dann über die Sicheln/Zahnräder (bzw. über die darin eingegossenen speziellen Beschläge) und die Schalenorbiter mit der Schale verbunden. Die Sicheln/Zahnräder sind über die speziellen Beschläge ihrerseits auch mit den anderen Schalenorbitern verbunden.

Die Wendevorrichtung besteht im Prinzip aus zwei baugleichen gekrümmten Balken, die mit einem Ende auf dem Boden aufstehen, und an deren anderem Ende Kranhaken angeschlagen werden. Dazwischen liegen die Verbindungen zu den Schalenorbitern bzw. zu den Sicheln/Zahnrädern.

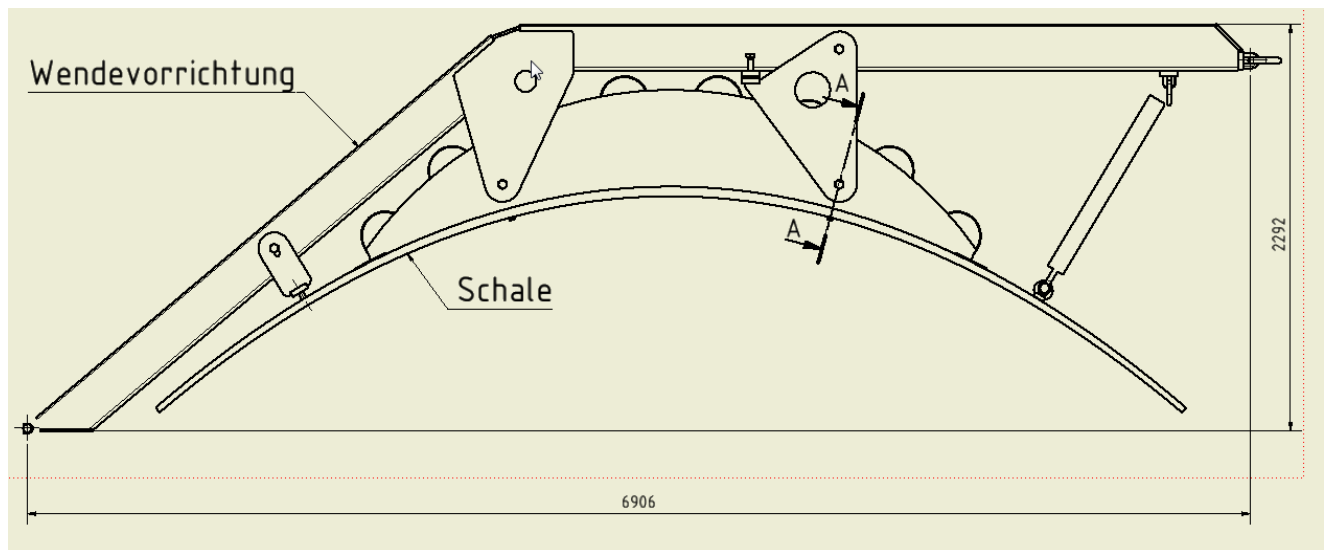
Durch synchrones Anheben der Kranhaken bevorzugt über eine Traverse wird der Wendevorgang eingeleitet. Durch zusätzliches seitliches Verfahren und Senken der Kranhaken ab dem Totpunkt (ca. 90°) wird die Schale um 180° gewendet und kann dann (nach Demontage der Verbindungsbolzen/-ösen) nach oben von der Wendevorrichtung abgehoben werden.

### ***Wendevorrichtung, Wendevorgang***





## Wendevorrichtung „Schubkarre“



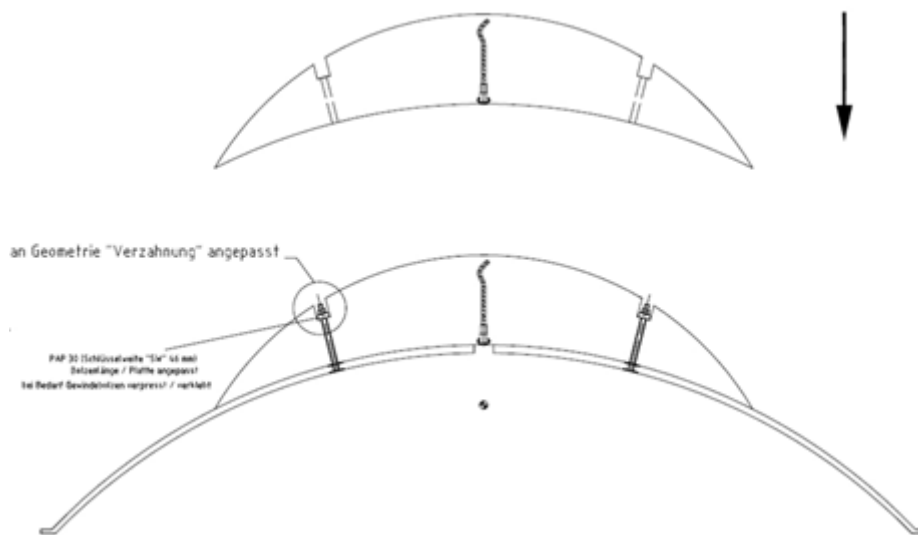
Die Verschraubung der Sichel erfolgt je über zwei sogenannten Orbiter mit der Betonschale. Die Außenbefestigungspunkte der Schubkarre sind ebenfalls direkt mit Orbiter in der Schale verschraubt. Da die Orbiter zum Anheben der Schale ausgelegt sind, werden sie auch dem Anheben mit der Schubkarre über die Sichel gerecht. Die vier Orbiter sind entsprechend ausgelegt und bemessen (siehe Anhebevorgang).

Der Kraftfluss vom Kran zum Schwerpunkt der Schale geht über die Traverse unter dem Kran oder zwei synchron operierenden Kränen wie oben beschrieben zu den beiden Schubkarrenbügeln. Diese greifen einerseits am Boden aufstehend mit Hilfe von zwei Blechlaschen direkt je seitlich an den Sichel an. Die Krafteinleitung zwischen den außen angreifenden Blechlaschen erfolgt über speziell ausgelegte Spezialbeschläge als Querverschraubungsanker „Orbi“ genannt, weil sie eine gewisse Formähnlichkeit mit den Anhebeorbitern haben. Vom Orbi wird mit einem Schraubenbolzen die Kraft in den Orbiter in der Schale weitergeleitet. Die Orbis verbinden zudem die beiden separat ausgeführten Teile der Sichel. Diese bestehen aus der Abrollsichel selbst und dem daneben angeordneten Zahnkranz, der das synchrone Bewegen der Schale ermöglicht auf dem Abrollhügel/Fundament.

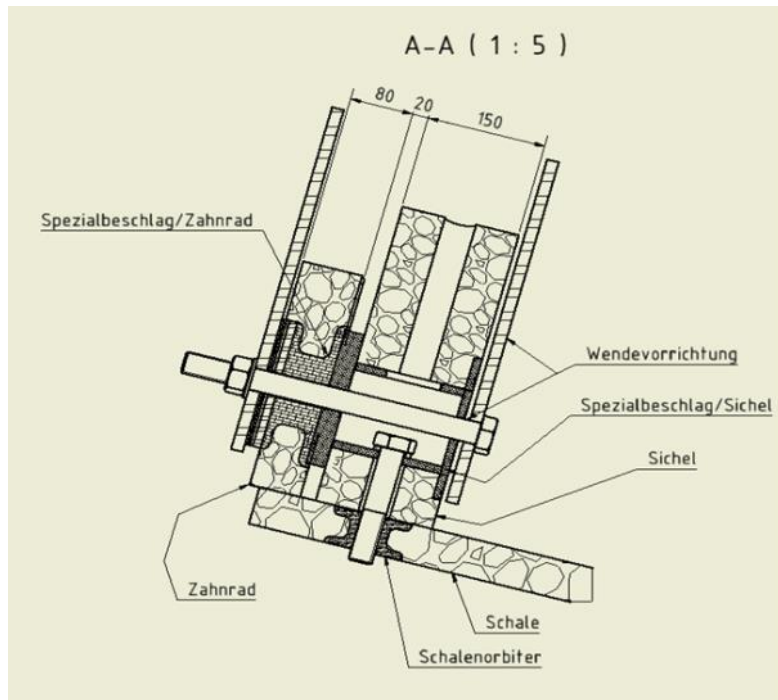
Der Montageablauf sieht in Einzelschritten so aus:

- Die Schale liegt über Kopf auf einem Ablagebock.
- Der Zahnbogen kann an der Abrollsichel vormontiert durch Querverschrauben mit dem Orbi und Verkleben.
- Die Sichel werden über die Schale gehoben.
- Wenn die Bohrungen passen und fluchten, wird die Sichel nochmals angehoben.
- Klebstoff wird auf die Kontaktfläche aufgebracht.
- Die Sichel wird ins Kleberbett gehoben.
- Die Querverschraubung mit dem Orbi wird gelöst und der Schraubenbolzen herausgezogen.
- Der Schraubenbolzen zum Orbiter wird eingescharbt und angezogen.

- Der Schubkarrenbügel wird in die Position über der Sichel gebracht.
- Die Querverschraubung durch die beiden Blechlaschen und Sichel durch den Orbi werden wird angebracht und angezogen.
- Die außen liegenden Befestigungspunkte der Schubkarre werden mit Schraubenbolzen in die Orbiter der Schale verschraubt.
- Dies geschieht in gleicher Art an beiden Sicheln, so dass dann der gesamte Schalenüberbau drehbereit ist.
- An den Karpunkten der Schubkarre wird nun synchron angehoben.
- Die gesamte Schale wird einseitig angehoben.
- Der Fußpunkt der Schubkarre übernimmt die Hälfte der Last.
- Der Kran hebt bis zum Drehtotpunkt, wo der Schwerpunkt über die Aufstandsfläche des Schubkarrenfußpunktes wandert, an.
- Vorsichtig darf nun nicht weiter angehoben werden, sondern der Kran nur seitlich bewegt werden, ansonsten würde die Schale komplett abgehoben werden.
- Durch das seitlich Verfahren dreht die Schale weiter und wird nun auf der anderen Seite abgelassen.
- Dabei kommen nun die Sicheln auf der Abrollfläche in Kontakt mit dem Boden.
- Nach Beenden des Drehvorgangs steht die Schale komplett auf den beiden Sicheln auf dem Boden.
- Die Verschraubungen der Schubkarrenbügel mit den Außenpunkten und den Orbis erfolgt.
- Die Schubkarrenbügel werden weggehoben.

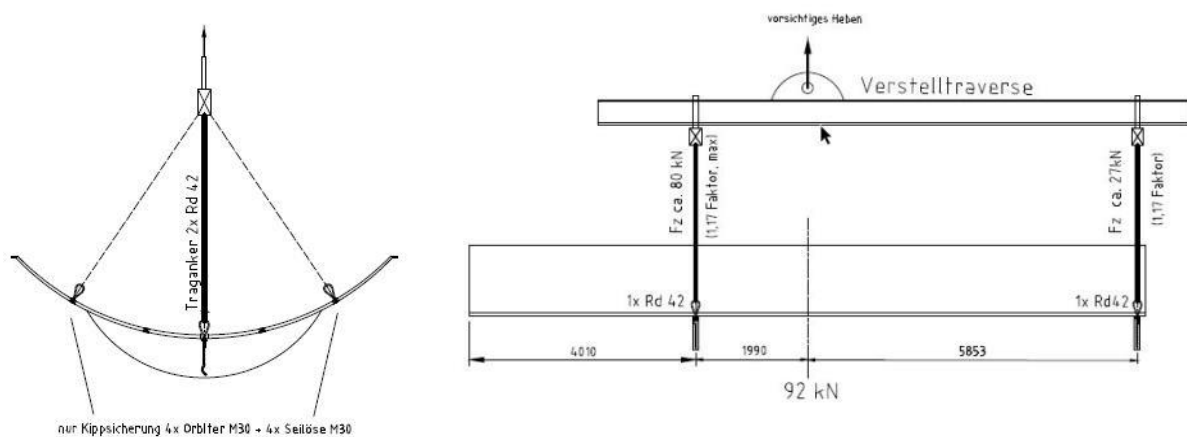


Sichelmontage im Prinzip (Verbindung jetzt verbessert gelöst mit Orbi)



Schnittdetail: Verbesserte Zahnrad-Sichel-Schalenverbindung mit Orbi und Orbiter durch Schraubbolzen

Abheben der Schale auf den Endplatz:



Schale in gedrehter Abhebeposition mit Hebestrang und Kippstabilisierungen

- Die Schale wird nun mit zwei Stabilisierungsgehängen als Kippsicherung und dem Zentralstrang zum Abheben an den berechneten und ausgewählten Transportankern PFEIFER Wellenanker Rd42 in der Sichel vorbereitet..
- Zur Lagesicherung werden die Lastaufnahmemittel PFEIFER Seilösen M30 in die noch freien äußeren Orbiter eingeschraubt.
- Das Gehänge wird lose angezogen.

- In die beiden Zentralanker in den Sichel werden PFEIFER Seilösen Rd42 als Lastaufnahmemittel zur Lastaufnahme beim Anheben vollständig eingeschraubt.
- Nur an vollständig eingeschraubten Seilösen in den Ankern in der Schale/Sichel darf abgehoben werden.
- Wenn beide Gehänge mit allen Seilösen in den Orbitern und Zentralankern angeschlagen sind, wird vorsichtig im beruhigten Schongang zum Vermeiden von dynamischen Lastspitzen angehoben. Dies erfolgt synchron über zwei Kräne an beiden Sichel oder über einen Kran mit einer Balkentraverse an beiden Sichel.
- Beim Anheben ist die asymmetrische Schwerpunktlage der Schale mit den asymmetrischen Sichel zu beachten.
- Bei Verwendung von zwei Kränen ist synchrones Anheben wichtig. Besser wäre ein Anheben über eine Lasttraverse wie skizziert.
- Die Schale wird sodenn auf die vorbereiteten Fundamente mit Sichel und Abrollhügel sowie Antriebsbock aufgesetzt.
- Die Sicherung gegen ungewolltes Verdrehen der Schale auf den Abrollhügeln wird als Abspannung in den Orbitern nach unten angebracht.
- Wenn die Lage der Schale gesichert ist, werden die Gehänge entlastet.
- Die Seilösen werden ausgeschraubt und der Anhebevorgang ist beendet.

Im Folgenden werden einige Bilder zum Dreh-Vorgang abgebildet:



Bild: montierte „Schubkarren“, also Zustand kurz vor dem Drehen





Bild: Beginn des Drehvorganges



Bild: die gedrehte Halbschale, noch auf den „Schubkarren“ lagernd



Bild: beide Halbschalen liegen erfolgreich gedreht im Lager, positioniert auf den Sichern



## **6.5. Montage der Demonstratormodule**

### **6.5.1. Vorbereitende Arbeiten auf dem Baufeld**

Als erste Maßnahme für den Aufbau der Demonstratoranlage musste das Baufeld vorbereitet werden. Diese Arbeiten wurden im November 2017 ausgeführt. Dazu wurde zunächst der Mutterboden abgeschoben und das Baufeld geebnet.

Bereits in den Monaten September und Oktober haben wir die für das Baufeld notwendigen Fundamente, Platten und die große Wasserwanne hergestellt. Diese wurden nun zum Baufeld transportiert und dort versetzt.

Im Anschluss wurde das gesamte Baufeld geschottert, um eine begehbare und saubere Oberfläche zu haben.

Auch an dieser Stelle konnten aufgrund fehlender Bauteile der Partner aus Kaiserlautern zunächst keine weiteren Aktivitäten unternommen werden.



Bild: die im Baufeld genau eingemessenen und versetzten Fundamente





Bild: alle Bauteile sind angeliefert und müssen nun versetzt werden



Bild: das fertige Baufeld

Mitte März 2018 wurden die ersten Fertigteile seitens der TU Kaiserslautern zu uns nach Borchten geliefert. Dabei handelte es sich um die Fundamentköcher sowie die Sichel. Die Sichel wurden wie zuvor beschrieben direkt montiert, ebenso erfolgte das Versetzen der Köcher in den Tagen nach der Anlieferung.



Bild: die Montage der Fundamentköcher ist erfolgt



### 6.5.2. Die eigentliche Hauptmontage

Anfang April 2018 wurden die restlichen Bauteile der TU Kaiserslautern per LKW zu uns nach Borchon geliefert. Die Entladung und Lagerung im Baufeld erfolgt umgehend. Geliefert wurden die Abrollhügel sowie der Antriebsbock.

Kurz danach haben wir die Montage begonnen. Mit einem leistungsstarken Telekran haben wir die Halbschalen zunächst aus unserem Lager zur Verwendungsstelle gehoben



Bild: das Herausheben der Halbschalen aus dem Lagerbereich

und sie dort zur weiteren Verwendung positioniert.



Bild: die vor dem Baufeld abgelegten Halbschalen

Direkt im Anschluss erfolgte die Montage des gesamten Unterbaus, also der Abrollhügel und des Antriebblockes.



Bild: die Abrollhügel sind montiert, der noch fehlende Antriebsblock hängt im Kran

Als abschließende Maßnahme wurden beide Halbschalen an ihre Montagestelle gehoben, um zu sehen, ob die Montage der Unterbauten stimmig ist und dass alles zueinander passt. Das war so. Die Halbschalen wurden dann vor dem Baufeld erneut abgelegt. Eine direkte Montage konnte nicht erfolgen, da zunächst die Installation des Antriebes des Projektpartners Pfeifer erfolgen musste.



Bild: die Halbschalen werden auf die Unterbauten geführt, die Zahnräder greifen ineinander

Nach erfolgter Antriebsmontage durch Pfeifer sowie Montage der Steuerung und Herstellung der elektrischen Verkabelung durch Solarlite konnten wir einige Tage später die sogenannte „Hochzeit“, also die finale Montage der Halbschalen, vornehmen. Dazu haben wir erneut einen Telekran bestellt. Die Halbschalen wurden auf die Abrollhügel gesetzt und dort mit Gurten gesichert. Im Anschluss haben wir den bewusst zurückgestellten Verguss der Abrollhügel in den Köchern erledigt. Damit war die Montage des Demonstrators laut der Aufgabenstellung des Arbeitspaketes 3 abgeschlossen.





Bild: der fertiggestellte Demonstrator

Direkt am Tag nach unserer Montage konnte bereits ein Testlauf erfolgen. Die Schalen wurden erfolgreich zu beiden Seiten gedreht.



Bild: der nach rechts gedrehte Demonstrator



Bild: der nach links gedrehte Demonstrator



## 7. Transport- und Montagekonzept

Die eigentliche Herstellung und die Abläufe in der Feldfabrik wurden zuvor ausgiebig beschrieben. Die Abläufe enden mit der Beschreibung im Lager der Feldfabrik. Hier werden die Sichel montiert und die Halbschalen gewendet.

Zur Kostenreduktion ist es wichtig, dass Baufeld und Feldfabrik in unmittelbarer Nähe zueinander geplant und aufgebaut werden. Aufgrund der Vielzahl an Fertigteilen, die in das Baufeld transportiert und dort montiert werden müssen, würden die Gesamtkosten bei langen Anfahrtswegen deutlich und unnötig steigen. Wahrscheinlich müssten Anfahrtsweg erst erstellt und dann unterhalten werden. Hinzu kämen die Kosten des Transportes (Fahrzeuge, Personal, Kraftstoff, etc.) an sich. Schlussendlich wäre das größte Problem, wenn Bauteile, insbesondere die Halbschalen mit über 6 Meter Breite, über öffentliche Verkehrswege transportiert werden müssten. Das ist bei der notwendigen Stückzahl und Frequenz an sich ausgeschlossen.

Derartige Kostenpositionen und Problematiken gilt es zu vermeiden, indem Produktionsstätte und Baustelle gleich nebeneinander liegen.

Das Fertigteilager, in dem die produzierten Komponenten aushärten und das Abklingen von Prozessen wie Kriechen und Schwinden abgewartet wird, ist gleichzeitig der zeitliche Puffer im Transport- und Montagekonzept. Die Entnahme aus dem Lager erfolgt zwangsläufig nur bei konkretem Montagebedarf im Baufeld (just-in-time). Zur Versorgung der Montage muss also ein dementsprechend großer Lagerbestand aufgebaut sein, so dass die Montagetätigkeiten zumindest über einen gewisse Zeitdauer unabhängig von der Produktion bei einer Havarie laufen können. Anders herum kann die Produktion bei Problemen im Baufeld weiterlaufen und das Lager aufbauen. In beide Richtungen ist man bei längerfristigen Problemen in der Lage, die jeweils nicht von einer Havarie betroffene Einheit „sanft“ zu drosseln und nicht gleich mit abschalten zu müssen. Aus diesem Grund werden die Aktivitäten auf dem Solarfeld erst 2-4 Wochen nach der Fertigstellung der ersten Betonteile gestartet. Im Anschluss wird die Installationsleitung auf dem Solarfeld, dem der Betonfertigteilproduktion angepasst.

### **7.1.      *Verladung und Transport zur Montagestelle***

Nach Abruf durch die Montageabteilung werden die fertigen Bauteile aus dem Lager entnommen. Alle Teile mit Ausnahme der Halbschalen werden ganz klassisch geladen und per Auflieger und Zugmaschine in das Baufeld transportiert. Hierbei entsteht ein Pendelverkehr mit wenigen Fahrzeugen und erhöhter Anzahl an Aufliegern. Die Auflieger werden beladen, die Zugmaschinen satteln mit Schnellkupplungen im Lager auf und im Baufeld wieder ab. Dort satteln sie den nächsten mittlerweile entladenen Auflieger auf und fahren diesen zurück ins Lager. Ähnliche Abläufe finden in Häfen überall auf der Welt statt und haben sich bewährt.

Die Schalen werden aus dem Lager mit Hilfe der bereits oben beschriebenen Portalhubwagen erst zur Montage Sichel und dann zu der Wendestation gefahren. Die dort gedrehten

Schalen (jetzt in der nach oben geöffneten Position) werden anschließend auf einen eigens dafür konzipierten Auflieger geladen und mit einer Zugmaschine zu dem Produktionszelt „Spiegelkleben/Receiverhalter“ gefahren. Dort verweilt der Auflieger bis alle Spiegelbleche verklebt und die Receiverhalter eingebaut sind. Anschließend fährt die Zugmaschine die fertiggestellte Schale in das Baufeld. Dort wird die Schale wieder mittels eines Portalhubwaagens aufgenommen und installiert. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Ablauf des Transportkonzeptes.

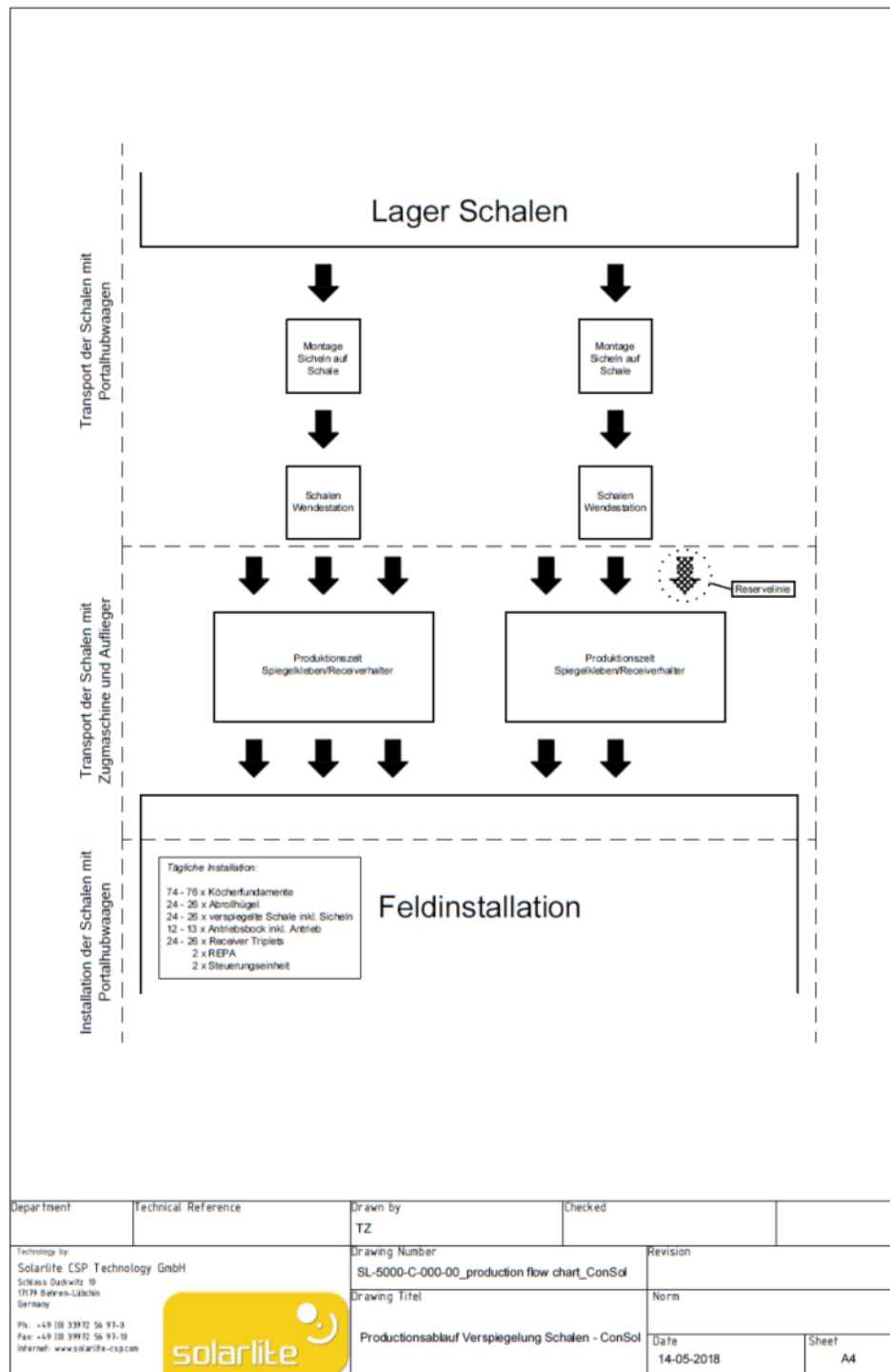


Abbildung: Transportkonzept Schalen von Lager zur Feldinstallation

## **7.2.      *Wenden und Vormontage Halbschalen***

Die Halbschalen werden ebenfalls just in time dem Lager entnommen. Allerdings können diese nicht einfach geladen werden, denn die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte „Montage der Sicheln“ und „Wenden der Halbschalen“ werden nun erst ausgeführt.

Die Montage der Sicheln erfolgt klassisch analog zur Montage bei den Demonstratormodulen. Die Sicheln werden auf die Rückseite der Halbschalen aufgesetzt und dort verklebt und verschraubt.

Das Wenden der Halbschalen würde mit Nichten wie bei den Demonstratormodulen erfolgen. Hier gäbe es eine hydraulische Wendestation. Die Halbschalen würden in eine passgenaue Wendestation eingelegt werden. Diese Station würde hydraulisch zufahren und der gesamte Apparat würde einmal in der Luft gedreht. Dann würde die Schalung wieder auffahren und die Halbschale könnte, jetzt gedreht, entnommen werden. Diese Wendestation kann man sich bildlich wie ein überdimensionales Waffeleisen vorstellen. Der große Vorteil ist, dass man sich nicht wie bei Demonstratormodule große Gedanken über die Kräfte, die auf die Halbschale wirken könnten, machen muss. In diesem Fall übernimmt der Wenderahmen, der selbstverständlich sehr steif sein muss, alle Kräfte. Die Fertigteilhalbschale erfährt, eingespannt zwischen zwei Deckeln, keine Beanspruchung.

Nachdem die Schalen mit den Sicheln verschraubt und gewendet worden sind, werden diese in ein extra vorgesehenes Vormontagezelt transportiert. Je nach Anzahl der zu verbauenden Kollektoren wird das Produktionszelt in Bezug auf dessen Größe ausgelegt. Für die im Anschluss an diese Kapitel betrachtete Kostenanalyse werden zwei Produktionszelte mit folgenden Abmaßen benötigt, Länge: 16m; Breite: 30m, Höhe: 6m. In diesen Zelten werden zum einem die Receiverhalter eingebaut und zum anderen die Spiegel verklebt. Als erstes werden die Receiverhalter eingebaut. Dies soll eine Beschädigung der Aluminiumspiegel verhindern, weil für den Einbau der Halter auf der Schale gelaufen werden muss und es vorkommen kann das Kleinteile wie Schrauben auf die empfindlichen Spiegel fallen können. Die Halter sollen eine maximale Abweichung von der idealen Fokallinie von  $\pm 3\text{mm}$  aufweisen. Der Einbau soll nicht länger als 20min dauern. Im Anschluss werden dann die Spiegel verklebt. Das applizieren der Aluminiumspiegel soll mit einer halbautomatischen Klebevorrichtung erfolgen (solch eine Vorrichtung konnte in diesem Vorhaben nicht entwickelt werden). Diese soll es ermöglichen eine vollständige Verklebung einer Halbschale innerhalb von 50 – 60min zu realisieren. Unter Berücksichtigung der Zeit (ca. 15min), die für das Positionieren und sichern der Halbschale und dem anschließendem Abtransport benötigt wird, kann für die Vormontage einer Schale von 1,5 Stunden gerechnet werden. Um auch hier den Transportaufwand so gering wie möglich zu halten, sollten diese Zelte nahe am Lager und dem eigentlichen Aufbauort aufgestellt werden. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau eines Produktionszeltes.

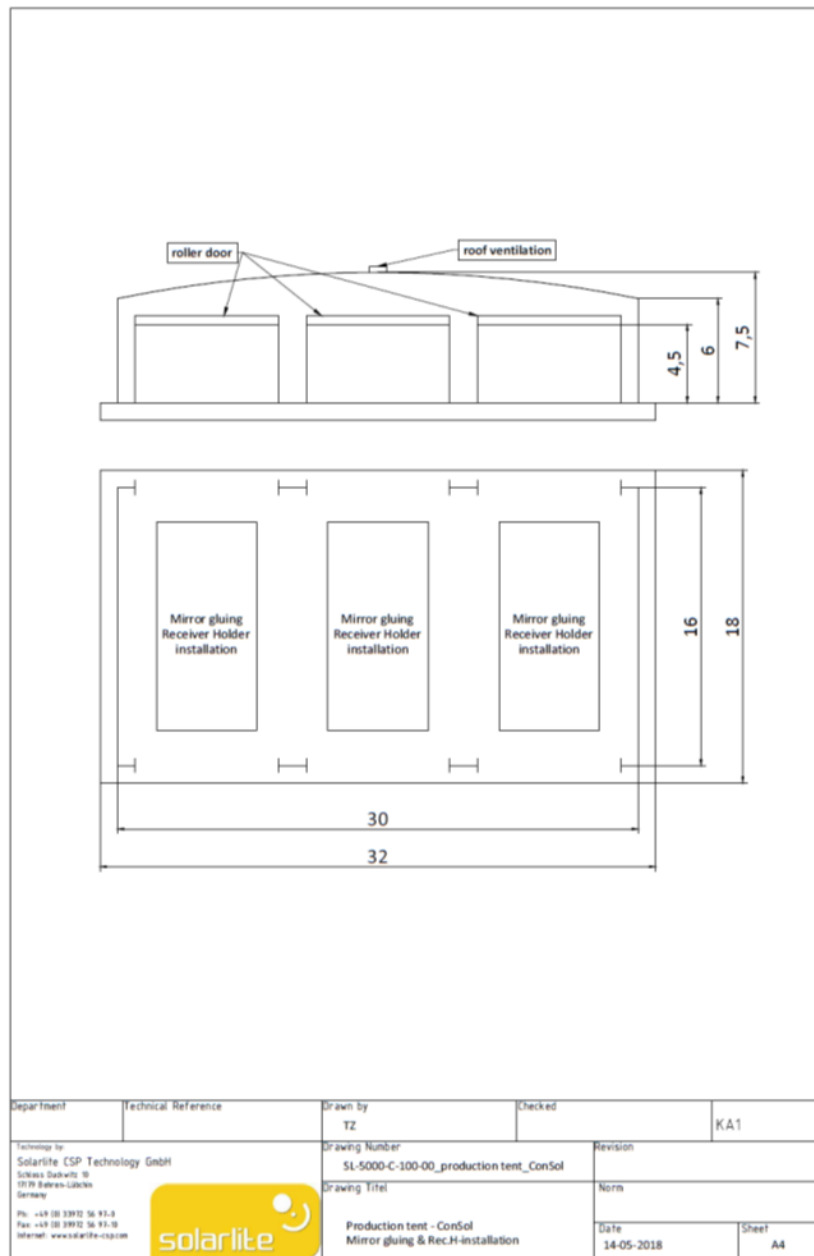


Abbildung: Produktionszelt für Spiegelkleben und Receiverhaltereinbau

### 7.3. Montage im Baufeld

Die Montage im Baufeld entspricht der Bauweise bei den Demonstratormodulen, allerdings dann im getakteten und zeiteffizienten Bauablauf. Für die einzelnen Fertigteilarten werden getrennt voneinander arbeitende Montagekolonnen gebildet, die allerdings zeitlich aufeinander abgestimmt sind. Da diese Kolonnen unterschiedliches Montagegerät benötigen, empfiehlt es sich, die Montagearbeiten zu entzerren und nicht eine Kolonne jeweils eine komplette Montage ausführen zu lassen.

1. Im ersten Schritt kommt eine Tiefbau-Kolonne zum Einsatz, die mittels Bagger Fundamentlöcher aushebt, die Fertigteilfundamente punktgenau versetzt und diese gleich wieder anfüllt.
2. Eine zweite Montagekolonne mit leichtem mobilem Hebegerät montiert die Abrollhügel samt Zahnlaufflächen sowie die Antriebsblöcke. Bautechnisch trifft diese Kolonne alle Vorbereitungen für die Montage der Halbschalen.
3. Im nächsten Schritt erfolgt durch eine Technikerkolonne die Montage des Antriebes sowie alle sonstigen technischen und elektrischen Installationen.
4. Danach erfolgt die Montage der Halbschalen mit großem Telekran. Die Zahnräder an den Sichern werden auf die Zahnlaufflächen der Abrollhügel gesetzt und beides somit verbunden. Die Rohbautätigkeiten sind damit abgeschlossen.
5. Schlussendlich nachgelagert zu den reinen Bautätigkeiten erfolgt der Endausbau mit Montage der vorschweißten Receiver-Triplet-Rohren. Diese werden aus je drei Receivern in einem separaten Schweißzelt vorgefertigt. Im Anschluss werden die RE-PA's an die Enden eines jeden Kollektors geschweißt und an die Feldverrohrung angeschlossen.

## **8. Kostenschätzung und Kostenermittlung**

Im Rahmen der regelmäßigen Arbeitstreffen, der Telefonkonferenzen sowie diverser Einzelgespräche ist eine vorläufige Kostenschätzung als Excel-Tabelle entstanden. Diese Tabelle ist während des Projektes des Öfteren, je nach Bekanntwerden weiterer Parameter, ergänzt und überarbeitet worden. So war in Bezug auf die Betonhalbschalen zum Beispiel anfangs überhaupt nicht klar, mit welchen Stundenansätzen zu kalkulieren ist und von welchem Aufwand insgesamt auszugehen ist. Nach der Produktion von den beiden Demonstratorhalbschalen lagen belastbare Ansätze vor. Die Erkenntnisse mündeten insgesamt in der nachfolgend beschriebenen Kostenermittlung.

Die Kalkulationen und Berechnungen an dieser Stelle wiederzugeben würde den Rahmen sprengen, da die Tabellen sehr umfangreich sind. Durch die immer wieder mitlaufenden Kostenschätzungen unter diesem Punkt erfolgten umfangreiche Arbeiten.

Im Rahmen der Kostenermittlung sollen in detaillierter Kalkulation sowohl die Kosten der Feldfabrik an sich (Sachwerte/Investitionen) als auch die Herstellungskosten (Lohnkosten/Stoffkosten) der einzelnen Fertigteile ermittelt werden.

Dabei werden zunächst Gesamtkosten ermittelt und am Ende auf jeweils Kosten je Tag heruntergebrochen. Es soll festgestellt werden, was ein Produktionstag kostet. Da aus den Vorgaben hinsichtlich der Gesamtstückzahlen zuvor die Tagesproduktion festgestellt worden ist, kann so der Preis einer Moduleinheit (= Demonstratorgröße) bestehend 2 Halbschalen mit allen dazugehörigen Zusatzteilen ermittelt werden.

### **8.1. *Kosten der Betonfertigteile***

#### **8.1.1. *Investitionskosten Feldfabrik***

Grundlage für die Kalkulation ist die zuvor im Detail beschriebene Feldfabrik sowie der dazugehörige Grundrissplan.

Leider waren aus dem konkreten Projekt im Oman, von dem die eingefügten Bilder stammen, keine belastbaren Zahlen zu erfahren, so dass ein eigener Ansatz gewählt werden musste. Es wird betont, dass es sich hier um Schätzungen handelt. Weiterhin wird der Ansatz des Erwerbes, nicht der Anmietung, von Sach- und Produktionsmitteln verfolgt. Im gesamten Projekt wird davon ausgegangen, dass die Feldfabrik nach erfolgter Produktion von einem Standort zum nächsten weiterzieht. Über eine lange Nutzungsdauer ist der Erwerb von Produktionsanlagen, besonders wenn diese sehr speziell und auf den Produzenten zugeschnitten ausfallen müssen, günstiger als dessen Anmietung.

#### **Erschließung des Baufeldes**

Als feste Investition in das Baufeld wird eine pauschale Summe von 250.000 € angesetzt. Es gilt das Baufeld zu begradigen und befahrbar herzustellen, wobei davon ausgegangen wird, dass es sich grundsätzlich um ein befahrbares und erschlossenes Gelände handelt. Im anderen Fall wären beträchtlich höhere Kosten anzusetzen. Weiterhin sind die 4 Betonsohlen für die Produktionszelte herzustellen.

wiederkehrende Kosten je Baufeld	<b>250.000 €</b>
----------------------------------	------------------

### Produktionszelte

Für die Anschaffung und Montage der 4 Fertigungsstätten (Zelte) und der Arbeitsplätze der 2 Eisenbiegereien wird von je rund 25.000 € Anschaffungskosten je Zelt ausgegangen.

**150.000 €**

### Kräne

Turmdrehkräne sind in der benötigten Größe recht gängig und werden weltweit von diversen Herstellern gebaut.

<b>4 Stück á 550.000 €</b>	<b>2.200.000 €</b>
----------------------------	--------------------

### Betonmischanlage

Das Herz der Feldfabrik stellt die Betonmischanlage dar. Hier ist es sehr schwer, an belastbare Zahlen zu kommen. Ich habe Kontakt zu lokalen Transportbetonherstellern aufgenommen und nach deren Investitionskosten gefragt. Zur Auskunft habe ich nach längeren Gesprächen für eine komplette Anlage inklusive Kühlung mit Scherben eis folgenden Wert genannt bekommen, der sicherlich aufgrund von örtlichen Parametern und der Situation auf dem Weltmarkt mit gewissen Unsicherheitsfaktoren behaftet ist:

**1.500.000 €**

### Büro-, Lager- und Sozialräum

Um für die Feldfabrik Lager, Technikräume, Sozialräume und Büros zu schaffen, werden Bürocontainer verwendet. Diese sind mobil und flexibel einsetzbar sowie im nächsten Projekt wiederverwendbar.

#### Sozialräume

Es wird zum Einnehmen der Mahlzeiten und für Pausen von 8 Containern ausgegangen. Pausen erfolgen im Wechsel der Schichten zu unterschiedlichen Zeiten, so dass eine Mehrfachbelegung erfolgt

8 Stück á 6.000 €	48.000 €
-------------------	----------

#### Sanitärcontainer

4 Stück á 6.500 €	26.000 €
-------------------	----------

#### Büroräume

10 Stück á 8.100 €	81.000 €
--------------------	----------

#### Lagercontainer

10 Stück á 2.500 €	25.000 €
--------------------	----------

#### Technikräume

5 Stück á 2.500 €	12.500 €
-------------------	----------

#### Betonlabor

2 Stück á 5.000 €	10.000 €
-------------------	----------



Gesamtkosten für alle Container betragen:

**202.500 €**

### **Lagerböcke**

150 Lagerplätze laut Lageplan, 2 Lagerböcke/Lagerplatz

Herstellungskosten eines Lagerbockes nach eigener Kalkulation: 723,00 €

150 Lagerplätze x 2 Lagerböcke/Lagerplatz = 300 Lagerböcke

**300 Lagerböcke x 723,00 €/Lagerbock = 216.900,00 €**

### **Produktionsformen**

14 Formen für Halbschalen

14 Stück á 85.000 €

1.190.000 €

25 Formen für Rand-/Mittelauflager mit angeformten Blockfundamenten

25 Stück á 10.000 €

250.000 €

7 Formen für Antriebsblöcke inklusive Zahnräder

7 Stück á 10.000 €

70.000 €

4 Formen (á 9 Teile) für Sicheln inklusive Zahnräder

4 Stück á 50.000 €

200.000 €

5 Formen (á 5 Teile) für Fundamente

5 Stück á 7.500 €

37.500 €

**Gesamtkosten für alle Schalungen**

**1.747.500 €**

### **Gerätekosten für Portalhubwagen**

In der Feldfabrik werden 2 Stück dieser Hubwagen benötigt, um die fertigen Teile von den Produktionsstätten ins Lager und von dort wiederum auf die Transportfahrzeuge zu heben. Zu den Investitionskosten haben wir Kontakt zu einem Hersteller aufgenommen, der diese Spezialhebemittel baut. Die Angabe erfolgt telefonisch.

**2 Stück á 485.000 €**

**970.000 €**

### **Gerätekosten für Radlader**

Radlader werden zum Heben geringerer Gewichte sowie zur Bestückung der Betonmischanlage mit Schüttgütern benötigt.

<b>4 Stück á 46.500 €</b>	<b>186.000 €</b>
---------------------------	------------------

#### **Gerätekosten für Transportmittel**

Die Transportmittel dienen dem Transport der fertigen Teile vom Lager in das Baufeld. Wie zuvor beschrieben wird von kurzen Transportwegen ausgegangen. Je Zugmaschine werden min. zwei Auflieger benötigt, sowie Reserveeinheiten

<b>10 Stück Zugmaschinen á 75.000 €</b>	<b>750.000 €</b>
---	------------------

<b>25 Stück Auflieger á 30.000 €</b>	<b>750.000 €</b>
--------------------------------------	------------------

Die Gesamtsumme aller zuvor genannten Investitionsgüter beträgt 8.672.900 €, im Folgenden wird mit Rechnung mit aufgerundet **9 Millionen Euro** fortgesetzt.

Zur Vereinfachung der Rechnung wird von einer generellen Nutzungsdauer von 10 Jahren über alle Investitionsgüter ausgegangen. Die Rechnung erfolgt überschlägig und pauschal, steuerliche Aspekte, Abschreibungen etc. werden nicht betrachtet.

anteilige Investitionskosten bei einer Produktionsdauer von einem Jahr

900.000 €

Einmalige Investitionskosten in das Baufeld

250.000 €

Reparatur-/Instandhaltungskosten:

12% der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes

120.000 €

Betriebskosten:

7 % der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes

70.000 €

Gemein- und Nebenkosten

7 % der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes

70.000 €

**Summe:**

.....**1.410.000 €**

Es werden 300 Arbeitstage je Jahr unterstellt, daraus folgt, dass die **Investitionskosten je Tag 4.700 €** betragen.

### 8.1.2. Personalkosten

Im Hintergrund zu diesem Themengebiet sind sehr umfangreiche Untersuchungen der Abläufe in der Feldfabrik erfolgt. Es wurden detaillierte Beleg- und Taktpläne erstellt, um die Bedarfsgrößen an Mitarbeitern abschätzen zu können. Aus Darstellungsgründen, aber auch weil es an dieser Stelle zu einer deutlich zu umfangreichen Berichterstattung führen würde, wird auf eine detaillierte Darstellung dieser Ausarbeitungen hier verzichtet.

Randbedingungen aus Voruntersuchungen

Frühschicht, Spätschicht und Nachschicht						
Kolonne	Anzahl pro Schicht	Anzahl Gesamt	Bezeichnung	Lohn Gr.	GTL (€/Std.)	Zulagen (€/Std.)
Aufsicht	1	3	Werkseiter	7	24,00	0,00
Schalkolonnen	6	18	Vorarbeiter	4a	16,11	0,55
	18	54	Facharbeiter	3	15,45	0,00
Eisenbieger	2	6	Vorarbeiter	4	16,11	0,30
	6	18	Fachwerker	2	14,70	0,00
Geräteführer	1	3	Mischmeister	6	17,50	0,50
	2	6	Kranfahrer	5	17,20	0,00
	2	6	Portalhubwagenfahrer	5	17,20	0,00
Sonstige	5	15	Hilfsarbeiter	1	12,00	0,00
<b>Gesamt</b>	<b>43</b>	<b>129</b>				

Weitere Randbedingungen:

- Arbeitszeiten: 7,5 Std./Tag, 6 Tage/Woche und 50 Wochen/Jahr  
Im Hochsommer (Juni, Juli, August) erhält die Früh- und Spätschicht eine Zulage von 15 %
- Nachtschicht: Nachtschichtzuschlag 25 %
- Samstag: Zulage 10 %
- Sozialkosten: Zuschlag 95 % aus Mittellohn A
- 114 Arbeitnehmer erhalte vermögenswirksame Leistungen (0,10 €/Std.)
- Werkseiter erhalten an 7 Tagen pro Woche eine Auslöse von 24,00 €/Tag

## Berechnung

Lohngruppe	GTL	Zulage	Früh- und Spätschicht		Nachtschicht	
			Anzahl	Gesamt	Anzahl	Gesamt
	€/Std.	€/Std.	-	€/Std.	-	€/Std.
<b>7</b>	24,00	0,00	2	48,00	1	24,00
<b>6</b>	17,50	0,50	2	36,00	1	18,00
<b>5</b>	17,20	0,00	8	137,60	4	68,80
<b>4a</b>	16,11	0,55	12	199,92	6	99,96
<b>4</b>	16,11	0,30	4	65,64	2	32,82
<b>3</b>	15,45	0,00	36	556,20	18	278,10
<b>2</b>	14,70	0,00	12	176,40	6	88,20
<b>1</b>	12,00	0,00	10	120,00	5	60,00
<b>Summe</b>			86	1.339,76	43	669,88
<b>Durchschnittslohn</b>				<b>15,58</b>	<b>15,58</b>	
<b>Hochsommer</b>	15,38 € x 0,15 x 3 M. / 12 M.			0,58		
<b>Nachtschicht-Zulage</b>	15,38 € x 0,25				3,85	
<b>Samstagszulage</b>	15,38 € x 0,1 x 7,5 Std. / 45 Std.			0,26	0,26	
<b>Vermögenswirksame Leistung</b>	114 Pers. X 0,10 / 129 Pers.			0,09	0,09	
<b>Mittellohn AP</b>				<b>Summe</b>	<b>16,31</b>	<b>19,58</b>
<b>Stundenzahl</b>	86 Pers. x 45 Std. 43 Pers. x 45 Std.			3.870	1.935	
<b>Mittlerer Mittellohn AP</b>	3.870 Std. x 16,31 € = 63.119,70 € 1.935 Std. x 19,58 € = <u>37.887,30 €</u> 101.007,00 € 101.007,00 € / 5805 Std.				<b>17,40 €/Std.</b>	
<b>Mittellohn APS</b>	17,40 € x 1,95				<b>33,93 €/Std.</b>	
<b>Auslösung</b>	<u>3 Pers. x 7 Tage x 24,00 €/Tag</u> 5805 Std/Wo.				<b>0,09 €/Std.</b>	
<b>Mittellohn APSL</b>				<b>Summe</b>	<b>34,02 €/Std.</b>	

**Mittellohn unter Einschluss der Aufsichtsgehälter beträgt 34,02 €/Std.**

Die zuvor bereits genannte Ausarbeitung der Taktpläne hat ergeben, dass in der Feldfabrik **5.805** Arbeitsstunden je Woche bei einer 6-Arbeitstageswoche anfallen. Das entspricht 968 Arbeitsstunden am Tag bzw. **Personalkosten von rund 33.000 €/Tag.**

## 8.2. Kosten und Mengenermittlung für die Betonherstellung

Von Herrn Penkert von der TU Kaiserslautern haben wir nachfolgende Aufstellung der Einzelbauteile erhalten:

Bauteilübersicht - ConSol				
Nr.	Typ	Anzahl	Volumen pro Bauteil [m³]	Gewicht pro Bauteil [kg]
1	Randauflager	2 Stück	0,593	1482,41
	Mittelauflager	2 Stück	0,593	1482,41
2	Antriebsbock	1 Stück	0,821	2052,53
3	Köcher Mittelaufleger	4 Stück	0,618	1545,47
4	Köcher Randaufleger	2 Stück	0,543	1357,78
5	Blockfundamente MA	4 Stück	1,154	2886,07
	Blockfundamente RA	2 Stück	1,049	2623,569
-	<i>Zahnrad unten</i>	<i>4 Stück</i>	<i>0,099</i>	<i>248,46</i>
-	<i>Lauffläche unten</i>	<i>4 Stück</i>	<i>0,202</i>	<i>506,240</i>
6	Zahnrad unten + Lauffläche unten	4 Stück	0,301	754,700
7	Zahnräder oben	4 Stück	0,106	265,72
8	Sicheln	4 Stück	0,225	563,65

Es muss bei der Betonherstellung zwischen Normalbeton und Nanodur unterschieden werden, da die Produktionskostenunterschiede erheblich sind. Nanodur (hochfester Beton) wird nur dort eingesetzt, wo dieser hochwertige Beton benötigt wird. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass Rand-/Mittelaufleger und Köcher sowie Zahnräder und Sicheln/Auflager zusammengefasst werden.

## Volumenberechnung Beton

Grundlage der folgenden Materialkostenkalkulation ist immer eine „Demonstratoreinheit“, also zwei Halbschalen mit den jeweils dazugehörigen weiteren Fertigteilen. In der nachfolgenden Tabelle sind diese im Detail aufgeführt. Aus dem Ergebnis kann am Ende abgeleitet werden, was es kostet, diese Anzahl an Fertigteilen in großer Serie herzustellen.

Typ	Anzahl je Tag	Volumen pro Bauteil [m³]	Volumen Beton je Tag	Bewehrung pro Bauteil	Bewehrung je Tag
<b>Normalbeton</b>					
Randauflager	25	1,136	28,40	170	4250
Mittelauflager	25	1,211	30,275	156	3900
Antriebsbock	12,5	0,821	10,263	150	1875
Blockfundamente MA	25	1,154	28,850	78	1950
Blockfundamente RA	50	1,049	52,450	86	4300
			<b>150,24</b>		
<b>Nanodur</b>					
Halbschalen	25	3,610	90,25	745	18625
Sicheln	50	0,225	11,25	27	1350
Zahnrad unten	50	0,099	4,95	48	2400
Lauffläche unten	50	0,202	10,10		
Zahnräder oben	50	0,106	5,30	18	900
			<b>121,85</b>	<b>39.550</b>	

Es werden an jedem Produktionstag rund 150 m³ Normalbeton und 122 m³ Nanodur benötigt.

## Rohmaterialien und Kosten

Normalbeton					
Material	Menge in kg/m³	Menge in kg für 150 m³	Materialkosten	Kosten in € pro m³	Kosten in € für 150 m³
Splitt 8/11	625	93.750,00	12,00 €/to	7,50	1.125,00
Splitt 2/8	357	53.550,00	12,00 €/to	4,28	642,60
Sand	782	117.300,00	11,00 €/to	8,60	1.290,30
Zement CEM III 42,5 R	350	52.500,00	85,00 €/to	29,75	4.462,50
Kalksteinmehl	200	30.000,00	35,00 €/to	7,00	1.050,00
Fließmittel	4,2	630,00	2,50 €/kg	10,50	1.575,00
Wasser	138	20.700,00	1,20 €/to	0,17	25,50
Gesamtkosten				67,80	10.170,90

Nanodur					
Material	Menge in kg/m³	Menge in kg für 122 m³	Materialkosten	Kosten in € pro m³	Kosten in € für 122 m³
Splitt 2/8	880	107.360,00	12,00 €/to	10,56	1.288,32
Sand	430	52.460,00	11,00 €/to	4,73	577,06
Nanodur® Compound	1050	128.100,00	380,00 €/to	399,00	48.678,00
Fließmittel	14	1.708,00	2,50 €/kg	35,00	4.270,00
Schwindreduzierer	6	732,00	5,50 €/kg	33,00	4.026,00
Wasser	155	18.910,00	1,20 €/to	0,19	23,18
Gesamt Kosten				482,42	58.862,56

Daraus ergeben sich Gesamtkosten für Normalbeton und Nanodur je Produktionstag von:

**10.170,90 € + 58.862,56 €**

**69.033,56 €**



Baustahl:

Aktuell werden bei uns Marktpreise für Liefern, Biegen und Verarbeiten von Baustahlbewehrung in Höhe von 1.250 € aufgerufen. Aufgrund der Mengen und der Tatsache, dass die aktuellen Baustahlpreise durchschnittlich eher am Hochpunkt liegen, wird ein Durchschnittspreis von 1.100 € je Tonne verarbeitetem Baustahl angesetzt. Baustahlpreise sind volatil, hier wird also eine Momentaufnahme abgebildet.

**39,55 to € x 1.100 €**

**43,505,00 €**

## **Kosten pro Modul**

Zusammenfassend ergeben sich je Produktionstag:

Investitionskosten:	4.700 €
Personalkosten:	33.000 €
Materialkosten	112,538 €

**Summe:** **150.238 €**

Die Tagesproduktion ist auf 25 Halbschalen ausgelegt, diese Größe ist die Maßgabe für alle anderen Produkte. 25 Halbschalen entsprechen 12,5 Demonstratoreinheiten. Demnach kostet eine Demonstratoreinheit mit

- 6 x Fundamenten
- 2 x Randaufleger mit Köchern
- 2 x Mittelaufleger mit Köchern
- 1 x Antriebsblock
- 4 x Sichel
- 2 x Halbschale

**150.246 €/12,5 Stück =**

**12.019,7 €**

Eine Demonstratoreinheit (= 2 Halbschalen) hat eine Gesamtfläche von

2 x 12 m x 5,77 m = 138,48 qm, daraus ergeben sich

12.019,7 € / 138,48 qm = 86,8 €/qm für die Gesamtkonstruktion je Quadratmeter Kollektorfläche.

Für das gesamte Baufeld ergeben sich Kosten in Höhe von

12.019,7 € x 3.744 Demonstratoreinheiten =

**45.001.680 €**

Zu beachten ist, dass diese Kosten ohne jeglichen Profit, Verwaltungskosten und Sicherheitsaufschläge gerechnet wurde. Folgender Ansatz für die die genaue Preisfindung gewählt. Es gibt einen prozentualen Zuschlag für allgemeine Verwaltungskosten des Unternehmens, gewünschter Profit an dem Projekt und einen Zuschlag für unvorhersehbare Kosten (Sicherheitsfaktor). Diese können je nach Größe des Vorhabens, Land in dem das Projekt umgesetzt wird, Neuheit des Technologieansatzes, etc. variieren. Folgende Zuschläge werden hier gewählt und werden anschließend auf die vorher genannte Bausumme dazugerechnet:

Verwaltungskosten:	3%
Profit:	8%
<u>Unvorhersehbare Kosten:</u>	<u>5%</u>
<b>Gesamter Zuschlag:</b>	<b>16%</b>

Somit ergibt sich ein tatsächlicher Verkaufswert für die herzustellenden Betonteile inklusive Investmentkosten für die Feldfabrik von:

$$45.001.680 \text{ €} \times 16\% = \mathbf{52.201.948 \text{ €}}$$

Hieraus errechnet sich dann der tatsächliche Quadratmeterpreis von:

$$52.201.948 \text{ €} / 3.744 \text{ Demonstrateureinheiten} / 138,48 \text{ qm} = \mathbf{100,7 \text{ €/qm}}$$

### **8.3. Kosten für die Feldinstallation**

Im folgenden Abschnitt werden alle Kosten aufgelistet, die benötigt werden um die gesamte Installation der Kollektoren im Feld zu realisieren. Hierzu gehören sämtliche Investitionskosten für die Produktionszelte und die benötigten Transportmittel sowie alle anfallenden Personalkosten inklusive Reisekosten für alle Spezialisten, die nicht zu der lokalen Mannschaft gehören.

#### **8.3.1 Investitionskosten für die Feldinstallation**

Die folgende Kostenaufstellung bezieht sich auf alle benötigten Investitionsgüter, die für die Montage der Kollektoren und der dazugehörigen Komponenten benötigt werden. Diese Feldinstallationen und Transportmittel wurde zuvor in dem Kapitel 7.1.3 Montage im Baufeld beschrieben. Es wird hier der gleiche Abschreibungsansatz verfolgt wie bei den Investitionskosten für die Feldfabrik (Abschreibung über 10 Projekte).

Beschreibung	Anzahl	Preis/Stück	Gesamtpreis €	Erläuterung
--------------	--------	-------------	------------------	-------------

Produktionszelt für Spiegelkleben	2	154.000	308.000	Jedes Zelt kann drei Schalen aufnehmen, inkl. Zugmaschine und Auflieger. Alle Vorrichtungen, Einbauten, Werkzeuge und die Betonplatte sind mit inbegriffen. Ausgenommen sind die Spiegelklebevorrichtungen Abmessung: B: 30m; L: 8m; H:6m
automatische Spiegelklebevorrichtung	4	35.000	140.000	Vier Klebestationen. Preisabschätzung, weil diese Thema nicht Bestandteil des Vorhabens war
Receiverschweißzelt	2	64.200	128.400	Jedes Zelt ist für zwei Schweißteams ausgelegt. Alle Vorrichtungen, Einbauten, Werkzeuge und die Betonplatte sind mit inbegriffen. Ausgenommen sind die Orbitalschweißgeräte Abmessung: B: 8m; L: 14m; H: 3m
Orbital Schweißmaschine + Endoskop-Set + Formierkammern	10	18.000	180.000	Inkl. drei Ersatzgeräte
6 x 40ft Container	2	2.000	4.000	zur Lagerung der vorgeschweißten Triplets
Traktoren	4	25.000	100.000	Zum Ziehen der Receiver-Triplett Trailers
Receiver-Triplett Trailer	4	8.500	34.000	zum Transport der geschweißten Triplets ins Solarfeld
Receiver Schweißwaagen (Solarfeld)	4	12.000	48.000	
REPA Schweißzelt	1	30.880	30.880	Alle Vorrichtungen, Einbauten, Werkzeuge und die Betonplatte sind mit inbegriffen. Abmessung: Breite: 5m; Länge 5m; Höhe: 3m
Trimble Station	2	70.000	140.000	Vermessungsinstrument zum Einmessen der Kollektoren
Portalhubwaagen	4	485.000	1.940.000	Für die Installation der Segmente im Feld
Zugmaschine + Auflieger	4	105.000	420.000	Zum Transport der Schalen vom Lager zum Produktionszelt Spiegelkleben und von dort zum Aufbau im Solarfeld
Teleskop Gabelstapler	3	100.000	300.000	Zum Setzen der Köcherfundament und zum Abladen von Gütern
Geländewaagen mit Pritsche	6	20.000	120.000	Für Installationsarbeiten, Baustellenüberwachung, etc.
Bürocontainer (20ft)	5	8.100	40.500	Zur Unterbringung der Baustellenleitung und den vor Ort tätigen Ingenieuren
Sanitärcontainer	4	6.500	26.000	
Lagercontainer (20ft)	6	2.500	15.000	Zur Lagerung von Kleinteilen wie Schrauben, Arbeitsschutzkleidung, etc.
Sozialräume (20ft)	9	6.000	54.000	Für die Arbeitspausen der Installationsmannschaft
		<b>Summe Kosten</b>	<b>4.028.780</b>	

Auf die Gesamtsumme der Investitionskosten werden nun, wie zuvor bei der Feldfabrik, die drei Faktoren: Verwaltungskosten, Profit und unvorhersehbare Kosten dazu gerechnet:

Verwaltungskosten	3%	120.863
Unvorhersehbare Kosten	5%	201.439
Profit	8%	322.302
	<b>Kosten gesamt</b>	<b>4.673.385</b>

Zur Vereinfachung der Rechnung wird von einer generellen Nutzungsdauer von 10 Projekten über alle Investitionsgüter ausgegangen. Die Rechnung erfolgt überschlägig und pauschal, steuerliche Aspekte, Abschreibungen etc. werden nicht betrachtet. Somit ergibt sich für die Umsetzung eines Projektes folgende anzusetzende Investitionskosten:

	Faktor	€
anteilige Investitionskosten bei einer Produktionsdauer von einem Jahr (Abschreibung über 10 Projekte)	10	467.338
Reparatur-/Instandhaltungskosten: 12% der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes	12%	560.806
Betriebskosten: 7 % der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes	7%	327.137
Gemein- und Nebenkosten 7 % der Investitionskosten des Nutzungszeitraumes	7%	327.137
	<b>Anteilige Kosten gesamt</b>	<b>1.682.419</b>

### 8.3.2 Personalkosten Feldinstallation

Im Folgenden werden die benötigten Personalkosten betrachtet. Diese werden unterschieden in interne Kosten und lokale Kosten. Die internen Kosten beziehen sich auf Supervision und auf interne und externe Ingenieurstätigkeiten des Generalunternehmers. Lokale Kosten entstehen, weil es am wirtschaftlichsten ist, die benötigten Bauleitungen, Vorarbeiter, Monteure und Hilfsarbeiter vor Ort anzuwerben/ einzustellen. Dies führt zu einer Reduzierung der Verwaltungs-, Unterbringungs- und Reisekosten des Generalunternehmers. Auch hat dies den Vorteil, dass sich die angeworbenen Arbeiter mit den lokalen Bedingungen auskennen und es keine sprachlichen Barrieren gibt.

Der benötigte Personaleinsatz für die internen arbeiten wird in vier Abschnitte über die Bauzeit unterteilt. Alle Bauabschnitte benötigen unterschiedliche Qualifikationen und haben verschiedene Dauern.

- I. Ingenieurstätigkeiten (*engineering*)
- II. Einkauf (*procurement*)
- III. Bau des Solarfeldes (*construction*)
- IV. Inbetriebnahme (*commissioning*)

Nach folgenden Rahmenbedingungen wurde die entsprechende Anzahl an Mitarbeitern, bezogen auf Ihre Qualifikation, und der Einsatzdauer errechnet:

Arbeitsstunden pro Tag	8
Arbeitstage pro Woche	5
Anzahl Arbeitswochen pro Jahr	50
Anzahl Kollektoren	624
Anzahl Monate für die Installation	12
Anzahl Monate für die Design, Auslegung und Entwurf	3
Anzahl Monate für die Inbetriebnahme	5
Anzahl Monate für Schulung des Kunden	1

Die folgende Tabelle zeigt den benötigten internen Personaleinsatz:

	daily rate	total cost	quantity	avarage mandays			
				engineering	procurement	constuction	commissioning training
CEO	633	83.520	1	10	20	60	42
Project manager	583	277.335	1	10	10	336	120
Project manager assistance	446	212.080	1	10	10	336	120
Engineering team	446	427.724	3	60	20	120	120
Survey specialist	446	149.703	1	0	0	336	0
Site supervisor	274	303.793	3	0	0	336	33
Specialist external	637	943.460	4	350	20	0	0
Welding supervisor	377	164.372	1	0	0	336	100
Admin	308	207.898	2	0	60	252	25
E,I & C external	692	297.693	2	60	5	40	110
Process external	788	338.957	2	60	5	40	110
total cost				1.166.939	152.487	1.370.487	716.622
total mandays				1850	320	3436	1332
avarage daily rate				631	477	399	538

Daraus ergeben sich interne Personalkosten von:

**3.406.535 €**

Zu den internen Personalkosten kommen noch zusätzliche Unterbringungs- und Reisekosten und der zu zahlende gesetzliche Verpflegungsmehraufwand für die Mitarbeiter des Generalunternehmers hinzu. Die folgende Tabelle zeigt die Aufschlüsselung dieser Kosten.

					long time stay		
					30 €		
			cost per flight	car per day	man night	daily allowance	
			1.000 €	30 €	50 €	29 €	496.220 €
Position	# days on site	# intern. flights	cost intern. flights	car rental	accommodation	allowance	Total (€)
CEO	102	12	12.000 €	3.060 €	3.060 €	2.958 €	21.078 €
Project manager	456	15	15.000 €	13.680 €	22.800 €	13.224 €	64.704 €
Project manager assistance	456	15	15.000 €	13.680 €	22.800 €	13.224 €	64.704 €
Engineer	240	8	8.000 €	7.200 €	12.000 €	6.960 €	34.160 €
Engineer	240	8	8.000 €	7.200 €	12.000 €	6.960 €	34.160 €
Engineer	240	8	8.000 €	7.200 €	12.000 €	6.960 €	34.160 €
Survey specialist	336	5	5.000 €	10.080 €	16.800 €	9.744 €	41.624 €
Site supervisor	436	5	5.000 €	13.080 €	21.800 €	12.644 €	52.524 €
Site supervisor	336	5	5.000 €	10.080 €	16.800 €	9.744 €	41.624 €
Site supervisor	336	5	5.000 €	10.080 €	16.800 €	9.744 €	41.624 €
Welding supervisor	436	5	5.000 €	13.080 €	21.800 €	12.644 €	52.524 €
E,I & C external	160	5	5.000 €	4.800 €	8.000 €	4.640 €	22.440 €
Process external	160	3	3.000 €	4.800 €	8.000 €	4.640 €	20.440 €

Die gesamten internen Reisekosten belaufen sich somit auf:

**496.220 €**

Der benötigte Personaleinsatz für die lokalen arbeiten wird in vier Abschnitte über die Bauzeit unterteilt. Alle Bauabschnitte benötigen unterschiedliche Qualifikationen und werden für verschiedene Zeiträume benötigt.

- I. Baustelleneinrichtung (*site mobilization*)
- II. Arbeiten im Produktionszelt (*production tent*)
- III. Feldinstallation (*field installation*)
- IV. Inbetriebnahme (*commissioning*)

Folgende zusätzliche Rahmenbedingungen wurde für benötigte Anzahl an lokalen Mitarbeitern mit hinzugefügt:

Anzahl Arbeitstage für die Baustellenvorbereitung	63
---	----

Anzahl Arbeitstage für die Produktion und Installation der Kollektoren	300
Anzahl der zu installierenden Kollektoren pro Tag	2,1
Anzahl Arbeitsstunden für die Produktion einer Halbschale	1,6
Anzahl der benötigten Montageplätze für die Halbschalenmontage	5

Die folgende Tabelle zeigt den benötigten lokalen Personaleinsatz:

	avarage mandays						
	daily rate	total cost	quantity	site mobi- lisation	production tent	field installa- tion	commissioning
site manager	290,00 €	134.270,00 €	1	63	300	0	100
assistance	174,00 €	161.124,00 €	2	63	300	0	100
site accounting/ HR	121,80 €	112.786,80 €	2	63	300	0	100
certificated welder	203,00 €	466.291,00 €	7	9	201	90	29
crane driver	203,00 €	223.300,00 €	3	0	100	200	67
driver	145,00 €	268.540,00 €	5	50	240	60	20
electrical techni- cian	185,60 €	153.305,60 €	2	63	0	300	50
helper	92,80 €	669.353,14 €	24	5	100	195	0
team leader	191,40 €	610.374,60 €	8	24	188	113	75
team leader alignment	191,40 €	114.840,00 €	2	0	0	300	0
worker	150,80 €	1.462.910,80 €	30	19	197	101	7
QC	174,00 €	104.400,00 €	2	0	300	0	0
HSE	232,00 €	200.216,00 €	2	32	300	0	100
total cost				276.242	2.428.772	1.582.878	393.820
total mandays				1701	15415	11340	2100
avarage daily rate				162,4	157,6	139,6	187,5

Daraus ergeben sich lokale Personalkosten von: **4.681.712 €**

Es ergeben sich somit Gesamtkosten für die Installation von: **8.584.467 €**

Aus diesen Gesamtkosten für die zu tätigen Investitionen und die Personalkosten ergibt sich ein Quadratmeterpreis von:

**1.682.419 € + 8.584.467 € / 3.744 / 138,48 m<sup>2</sup>** **19,8 €/m<sup>2</sup>**

#### **8.4. Kosten für weitere Komponenten**

In diesem Abschnitt werden die Kosten pro Quadratmeter Spiegelfläche für die restlichen Komponenten aufgelistet, die für die Kollektoren benötigt werden. Die hier aufgelisteten Prei-



se kommen von den zuständigen Projektpartnern. Die folgende Tabelle zeigt die angesprochenen Kosten.

Bezeichnung	Projektpartner	Gesamtpreis in €	Quadratmeterpreis €/m <sup>2</sup>
<b>Spiegel und Klebeband</b>		<b>10.887.852</b>	<b>21,0</b>
<i>Aluminiumspiegel</i>	<i>Almecco</i>	<i>8.295.506</i>	<i>16,0</i>
<i>Klebeband</i>	<i>Solarlite</i>	<i>2.592.346</i>	<i>5,0</i>
<b>Einbauteile für Betonteile</b>	<b>Pfeifer</b>	<b>2.536.408</b>	<b>4,9</b>
<b>Receiverhalter</b>	<b>Solarlite</b>	<b>2.333.111</b>	<b>4,5</b>
<b>REPA</b>	<b>Solarlite</b>	<b>2.022.030</b>	<b>3,9</b>
<b>Nachführungssystem</b>		<b>10.803.936</b>	<b>20,8</b>
<i>Antriebseinheit</i>	<i>Pfeifer</i>	<i>7.559.136</i>	<i>14,6</i>
<i>Steuerungseinheit</i>	<i>Solarlite</i>	<i>3.244.800</i>	<i>6,3</i>
<b>Receiver</b>	<b>Solarlite</b>	<b>15.275.520</b>	<b>29,5</b>
	<b>Gesamt</b>	<b>43.858.856</b>	<b>84,6</b>

Aus den genannten Kosten ergeben sich folgende Kosten für die gesamte Installation von 624 Kollektoren:

Bezeichnung	Gesamtkosten in €	Quadratmeterpreis €/m <sup>2</sup>
Betonfertigteile	52.201.948	100,7
Feldinstallation	10.266.886	19,8
Komponenten	43.858.856	84,6
<b>Summe</b>	<b>106.327.690</b>	<b>205,1</b>

# ConSol

Concrete Solar Collector

## Bericht AP 4

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011  
Förderkennzeichen: FKZ A-G  
Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebetechnik GmbH

Almeco GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteile GmbH

# Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Aufbau einer vereinfachten Fertigung.....	3
4. Fertigung eines oder mehrerer Konzentrator-Module .....	3
5. Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung.....	3
6. Beschaffung bzw. Fertigung und Montage der übrigen Systemkomponenten außer Konzentratormodul und Antrieb .....	4
6.1 Receiverhalter .....	4
6.2 Receiver.....	4
6.3 Flexible Rohrverbindung (REPA).....	6
6.4 Rohrleitung inklusive Pumpe, Sensorik und Ventile.....	9
6.5 Steuerungseinheit .....	11
7. Vorbehandlung und Qualitätsprüfung der Oberflächen.....	12
8. Vorrichtung entwickeln und Handlingkonzept zum Auftragen des Klebers in gleichmäßige Stärke.....	12
9. Fertigung Spiegelmaterial und Vorbereitung Rückseite für die Verklebung.....	12
10. Verklebung von Spiegel und Konzentratormodul, Monitoring des Aushärtens .....	12
11. Fertigung und Beschaffung des Antriebssystems .....	15
12. Montage, Inbetriebnahme und Optimierung des Antriebssystems .....	17
13. Inbetriebnahme Montage und Testbetrieb des Demo-Kollektorsystems und mechanischer Betrieb.....	21
13.1 Überprüfung der Beweglichkeit des Kollektors .....	21
13.2 Überprüfung der Beweglichkeit der REPA.....	23
13.3 Inbetriebnahme der Pumpe, Überprüfung auf Dichtigkeit .....	24
13.4 Inbetriebnahme der Sonnenstandsnachführung .....	24
14. Messkampagne zur optischen Qualifizierung des Demonstratormoduls .....	24
15. Abschätzung des optischem Wirkungsgrads, Interpretationen und Optimierungspotential.....	31

## 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1			
2			
3			
4			
5			
6			

**Tabelle 1-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 4

In Rahmen des AP 4 wurde ein Prototyp bestehend aus zwei Kollektormodulen und einem Antrieb bei der Firma Stanecker errichtet.

Dazu wurde die Statik für dieses Bauwerk prüffähig aufgestellt und durch einen unabhängigen Statiker geprüft.

Der Prototyp wurde vermessen und der Betrieb mit Nachführung mit einem einfachen Wasserkühlkreislauf getestet.

Mittels einer Fotogrammetrie wurde ein Interceptwert von lediglich 46% für die Zenitposition ermittelt, der insbesondere durch eine (erwartete) Aufweitung des Kollektormoduls zustande kommt. Dies kann durch eine Verschiebung des Receivers teilweise kompensiert werden, dann beträgt der Interceptwert 86%.

## 3. Aufbau einer vereinfachten Fertigung

Der Aufbau einer vereinfachten Fertigung würde bereits in dem AP 3, Abschnitt *Realisierung Demonstrator* beschrieben.

## 4. Fertigung eines oder mehrerer Konzentrator-Module

Der Aufbau einer vereinfachten Fertigung würde bereits in dem AP 3, Abschnitt *Realisierung Demonstrator* beschrieben.

## 5. Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung

Die Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung würde bereits in dem AP 2, Abschnitt 5 *Herstellung der Fundamente und der Kollektorführung* beschrieben.

## 6. Beschaffung bzw. Fertigung und Montage der übrigen Systemkomponenten außer Konzentratormodul und Antrieb

Dieser Abschnitt beschreibt die Systemkomponenten, die nicht zu dem Konzentratormodul und dem Antrieb gehören. Folgende Komponenten werden im Anschluss beschrieben:

- I. Receiverhalter mit dazugehörigen Komponenten
- II. Receiver
- III. Flexible Rohrverbindung – REPA
- IV. Rohrleitung inklusive Pumpe, Sensorik und Ventile
- V. Steuerungseinheit

### 6.1 Receiverhalter

Alle Komponenten, die zu dem Receiverhalter gehören wurden bereits in AP 2, Abschnitt *Definition der Kollektorhalterungen (auch Pylone), flexible Verbindungen usw. (Material, Gewicht, Kosten, Verfügbarkeit, Montage)* beschrieben. Die folgenden Bilder zeigen die montierten Bauteile.

Besonders zu beachten war, dass alle Halterungen genau in einer Linie installiert wurden. Diese wurde mit einer Vorrichtung erreicht, die über die Breite (5,77 m) gelegt wurde und eine Markierung im Zentrum hatte. So wurde alle Halter in einer Flucht eingebaut.

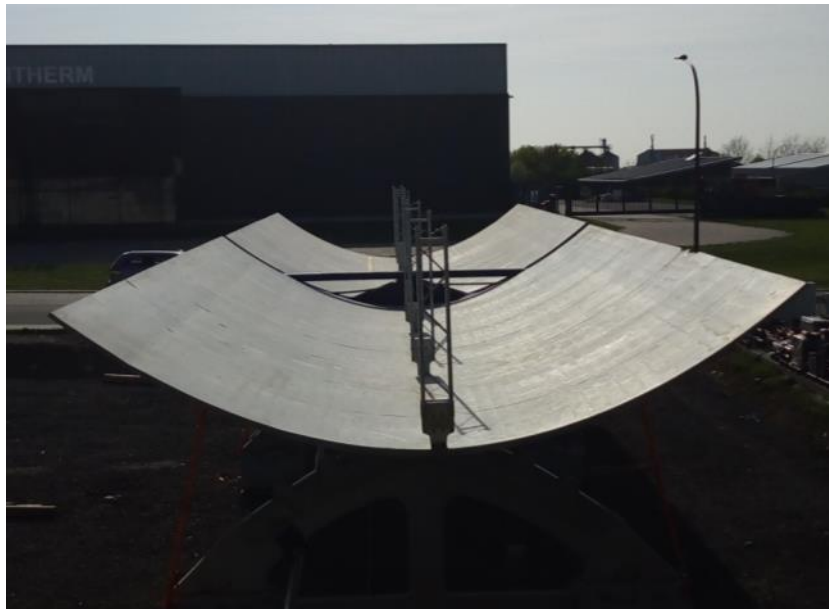


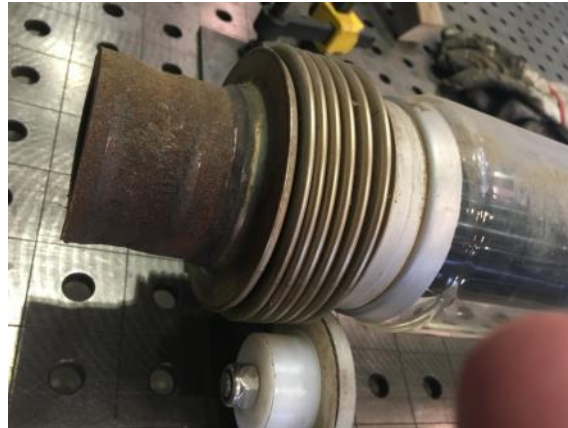
Bild 6.1.1 Installierte Receiverhalter

### 6.2 Receiver

Für den Demonstrator wurden insgesamt sechs Receiver benötigt. Diese wurde über das DLR von der Plata Forma Del Solar aus Almeria beschafft. Die Receiver wurden in einer

transportfähigen Holzbox zu der Firma SAW in Borchten geliefert. Dort wurde die Receiver vorbereitet und dann anschließen auf der Baustelle verschweißt und in die vorher installierten Receiverhalter eingebaut. Folgende Bilder zeigen die Anlieferung der Receiver und deren Einbau.

Wie auf dem Bild 6.2.1 zu sehen ist, waren die Receiver bereits einmal eingebaut. Bevor diese in den Kollektor eingebaut werden konnten, mussten die Enden sauber abgetrennt und gereinigt werden.



**Bild 6.2.1 Angelieferte Receiver**

Anschließend wurden dann drei der vorher vorbereiteten Receiver direkt auf dem Kollektor zu einem Receiver-Triplet zusammengeschweißt. Siehe Bild 6.2.2



**Bild 6.2.2 Triplet-Schweißen**

Als letzten Schritt der Receiverinstallation mussten die beiden Triplet über dem Antrieb zusammengeschweißt werden. Siehe Bild 6.2.3



**Bild 6.2.3 Zusammenführung der Triplets**

### **6.3 Flexible Rohrverbindung (REPA)**

Die flexiblen Rohrverbindungen für den Demonstrator wurde nach dem erarbeiteten Konzept aus AP2 erarbeitet. Hierfür wurden sechs Kugelgelenke benötigt, die ebenfalls vom DLR aus Almeria zur Verfügung gestellt wurden. Bild 6.3.1 zeigt die gelieferten Kugelgelenke. Wie an dem Bild zu erkennen ist, sind diese stark verrostet. Damit diese wieder gangbar gemacht werden konnten, wurden sie für mehrere Tage in ein Ölbad gelegt. Anschließend konnten sie in der Schweißfachwerkstatt der Firma SAW vormontiert werden. Bild 6.3.2 zeigt die Fertigungszeichnung der REPA.



**Bild 6.3.1 Kugelgelenke**







**Bild 6.3.3 Installation REPA**

Folgendes Bild 6.3.4 zeigt den Demonstrator mit installierten Receivern und REPA.



**Bild 6.3.4 Eingebaute Receiver und REPA**

## 6.4 Rohrleitung inklusive Pumpe, Sensorik und Ventile

Für die Beschaffung der benötigten Komponenten für die Rohrleitung, Pumpe, Sensorik und Ventile mussten vorab ein Prozessfließbild und eine Rohrleitungsisometrie erstellt werden. Nach Absprache aller Projektteilnehmer wurde beschlossen, dass die Austrittstemperatur des Wassers nicht über 90 °C ansteigen soll. Somit wird dann auch eine direkte Verdampfung in den Receiverrohren vermieden. Um dies zu gewährleisten wurde an der Austrittsseite eine digitale, sowie analoge Temperaturmessung vorgesehen. Weiterhin wurde an der Eintrittsseite auch eine Temperaturmessung eingebaut. So kann zu jeder Zeit die erzeugte Temperaturdifferenz bestimmt werden. Zusätzlich wurden mehrere Ventile für das System vorgesehen, um die Durchflussmenge zu regulieren und eine Befüllung der Rohrleitung zu ermöglichen. Bild 6.4.1 zeigt das Prozessfließbild.

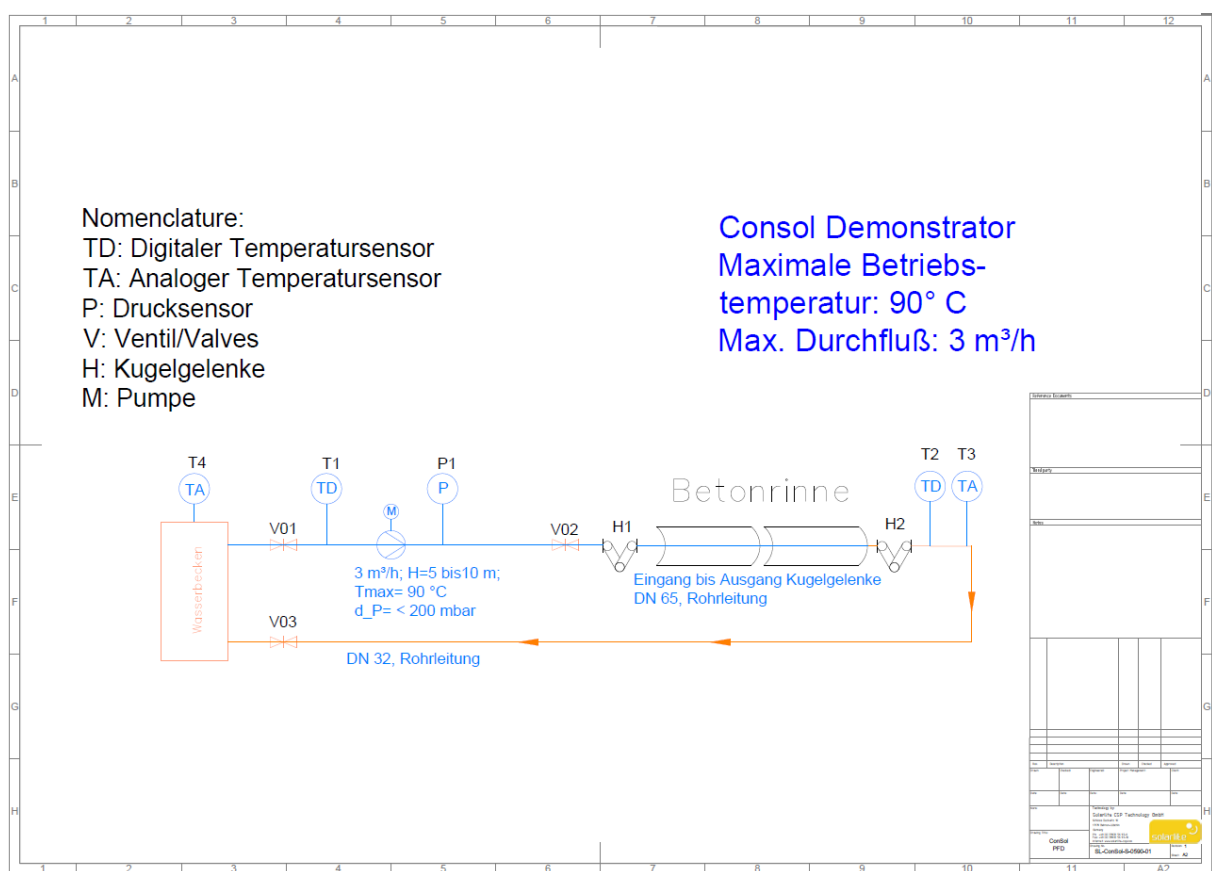
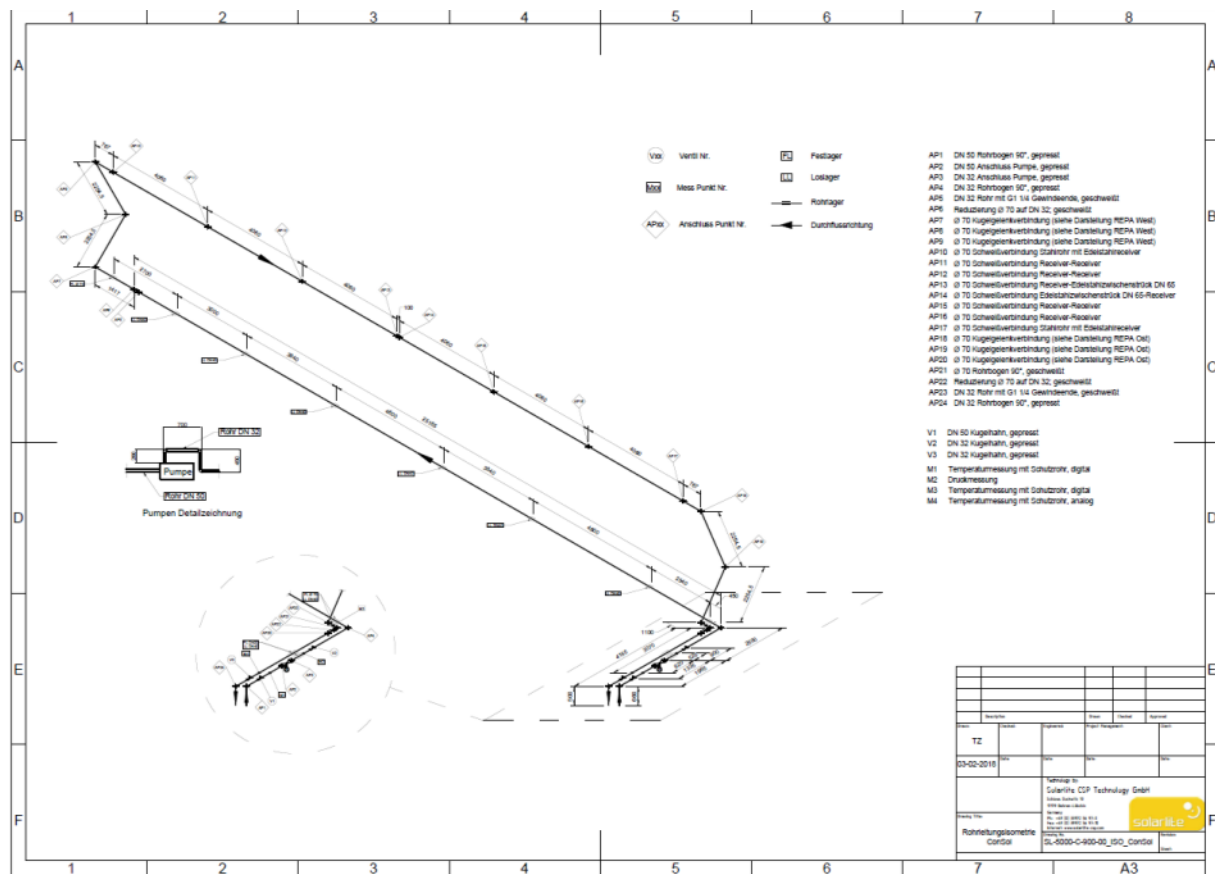


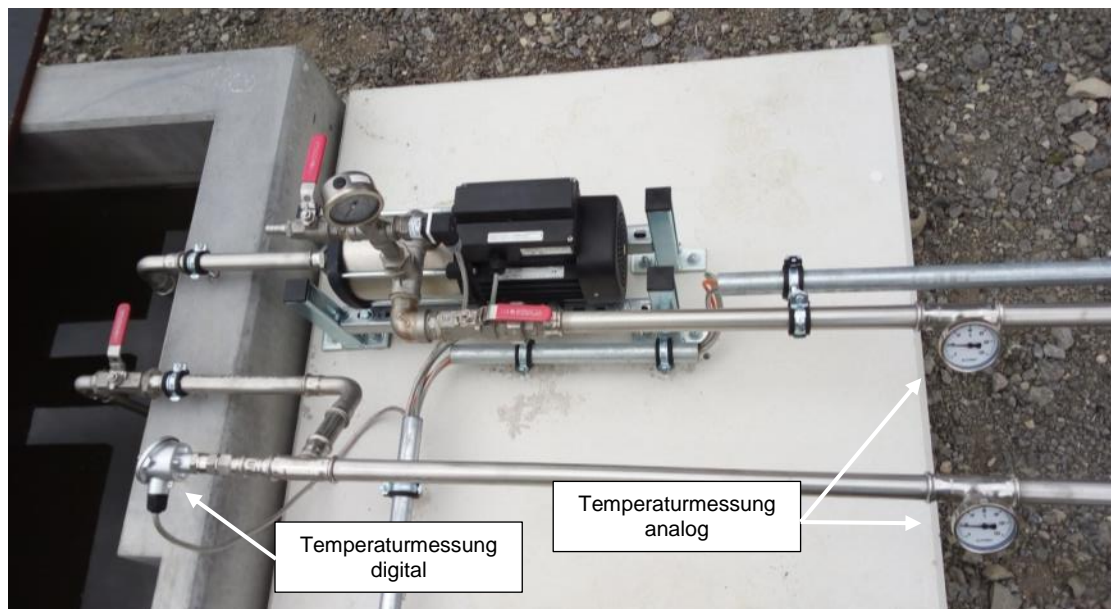
Bild 6.4.1 Prozessfließbild

Auf Grundlage dieses Prozessfließbildes konnten dann auch die anderen Komponenten ausgelegt werden. So wurde eine Pumpe der Firma *Grundfos* mit einer Pumpenleistung von 3 m³/h ausgewählt. Für die Rohrleitung (ausgenommen Receiver und REPA) wurde ein Durchmesser von DN 32 bestimmt und als Material Edelstahl gewählt. Aufgrund der geringen Prozessparameter ( $t \leq 90\text{ °C}$ ) und der einfacheren Montage wurde sich für ein Pressrohrsystem entschieden. Das Bild 6.4.2 zeigt die erstellte Rohrleitungsisometrie.



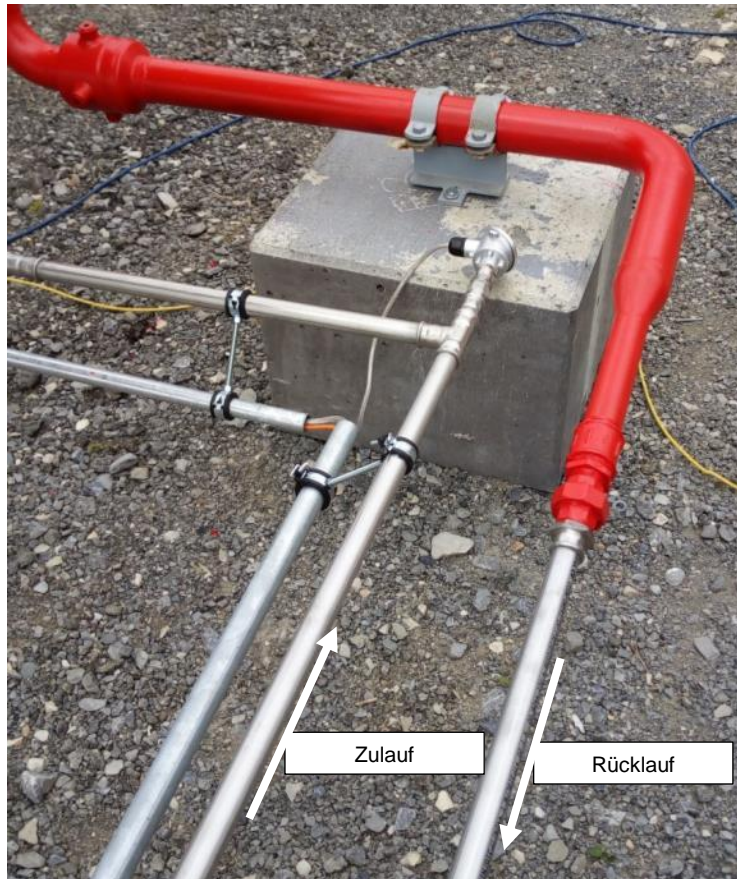
**Bild 6.4.2 Rohrleitungsisometrie**

Die folgenden Bilder 6.4.3 und 6.4.4 zeigen die hier beschriebene Installation.



**Bild 6.4.3 Installation Pumpe, Sensorik, Ventile**





**Bild 6.4.4 Installation Rohrleitung**

## 6.5 Steuerungseinheit

Die Beschaffung der Steuerungseinheit wurde bereits in AP 2, Abschnitt 7 *Herstellung der Antriebsregelung, Algorithmen und Sensorik für Sonnenstandsnachführung* beschrieben. Bild 6.5.1 zeigt die installierte Steuerungseinheit.



**Bild 6.5.1 Installierte Steuerungseinheit**

## **7. Vorbehandlung und Qualitätsprüfung der Oberflächen**

Eine Vorbehandlung der Betonoberfläche war nicht nötig, wie in Vorversuchen gezeigt wurde. Auch hat sich der Spiegel später nicht von der Betonoberfläche gelöst.

An einigen Stellen der Kollektorschalen liegen Verschraubungen. Sie sind leicht tieferliegend, so dass der Spiegel nicht nach vorne gewölbt wurde. Wegen der Steifigkeit des Spiegels konnten die Bereiche überbrückt werden und der Spiegel folgt der die Verschraubungen umgebenden Oberflächenkontur.

## **8. Vorrichtung entwickeln und Handlingkonzept zum Auftragen des Klebers in gleichmäßige Stärke**

Als Kleber wurde doppelseitiges Klebeband der Firma Tesa eingesetzt. Flüssige Kleber führen zumindestens bei händischem Auftrag zu unregelmäßigen Schichtdicken. Dadurch liegt der Spiegel anschließend nicht mehr in der vorgegeben Form auf. Das Klebeband wurde bereits in Vorrichtungen bei der Firma Almeco maschinell auf das Spiegelcoil aufgetragen.

Die Spiegel wurden vor Ort zugeschnitten und die Stücke händisch auf den Kollektor geklebt.

## **9. Fertigung Spiegelmaterial und Vorbereitung Rückseite für die Verklebung**

Die Fertigung des Spiegelmaterials wurde bereits in AP 1.3, Abschnitt 4 *Optimierung Reflektormaterial für die Montage mittels Klebetechnik* beschrieben.

## **10. Verklebung von Spiegel und Konzentratormodul, Monitoring des Aushärtens**

Um vor dem Aufbringen des Spiegelmaterials auf das Demo-Modul zu testen, wie sich das Spiegelmaterial beim Verkleben mit dem TESA-Klebeband auf eine Betonoberfläche verhält, wurde dieses zunächst auf das Beton-Testelement aufgebracht. Das Aufkleben des Aluminiumspiegels auf das Beton-Testelement war nach Aussage der Mitarbeiter der Firma Solarlite einfacher als mit vergleichbaren Dünnglasspiegeln (siehe Bild 10.1).



**Bild 10.1: Aufkleben des Aluminiumspiegelmateri als auf das Testelement**

Die Haftung des Aluminiumspiegels auf der Betonoberfläche, die vorher mit Isopropanol gereinigt wurde, war gut. Als problematisch hat sich erwiesen, dass sämtliche Unebenheiten auf der Betonoberfläche auch auf der Spiegeloberfläche sichtbar sind (siehe Bild 10.2). Daher wurde beim Demomodul auf eine wesentlich glattere Betonoberfläche geachtet.



**Bild 10.2: Fertiges Testelement mit aufgeklebtem Aluminiumspiegel**



Nach dem Aufbringen des Spiegelmateri als auf das Beton-Testelement wurde die Parabolrinne mit Hilfe von Gasbrennern auf etwa 60°C aufgeheizt. Dabei konnte bestätigt werden, dass das Tesa Klebeband in der Lage ist, die Längenausdehnungsunterschiede zwischen Beton und Aluminiumspiegelmaterial aufzunehmen. Es wurden keine Ablösung oder Verformung des Aluminiumspiegelmaterials beobachtet.

Da nach etwa einem dreiviertel Jahr, bei dem das Beton Testelement bei der Firma Stan-ecker auf einer Freifläche abgestellt war, keine Probleme mit der Verklebung des Spiegelma-terials beobachtet wurden, wurde entschieden, auch auf das Spiegelmaterial für das De-monstrator-Modul das 1,1mm dicke Tesa Klebeband auf der industriellen Bandlaminierungs-anlage aufzubringen (siehe Bild 1.3.6).

Für das Demo-Modul wurde 0,4mm dickes elektrochemisch poliertes und anschließend ano-disiertes Aluminium mit Schichtsystem Gen 2C beschichtet. Anschließend wurde die Sol-Gel Schutzschicht Typ B auf einer industriellen Bandlackierungsanlage aufgetragen.

Um die Spiegeloberfläche bei der Montage auf das Demo-Modul zu schützen, wurde noch eine Schutzfolie ausgewählt und aufgebracht.

Das Aufkleben dieses durch die gelbe Folie geschützten Materials auf das Demo-Modul ver-lief ähnlich problemlos wie bei dem Beton-Testelement (siehe Bild 10.3**Fehler! Verweisquel-le konnte nicht gefunden werden.**).



**Bild 10.3: Aufkleben der Aluminiumspiegel auf die Parabolrinne des Demonstrator-Moduls**

Im Bild 10.4 ist das vollständig mit Spiegeln versehene Demo Modul nach Abziehen der gel-ben Schutzfolie zu sehen.



**Bild 10.4: Demonstrator Modul mit vollständig aufgeklebten Spiegeln**

## **11. Fertigung und Beschaffung des Antriebssystems**

Die Antriebsteile und -komponenten sind in der unten gezeigten Abbildung gezeigt. Die vier Baugruppen wurden wiederum in einzelnen Zeichnungen siehe Beispiel Abb 4.11.2 dargestellt mit Stückliste aufgelöst in Einzelteile. Es wurde Wert darauf gelegt, standardisierte Teile wo immer möglich zu verwenden, die einfach und schnell beschaffbar sind. Dies auch um eventuell später benötigte Ersatzteile schnell und kostengünstig verfügbar zu erhalten.

Die Standardteile wurden nach je nach Stückliste bei Lieferanten für Normalien bestellt und wo nötig nachbearbeitet.

Angesichts der Vielzahl der kleinsten Einzelteile wie Splinte, Muttern, Scheiben, Stecker etc. sind diese Details hier nicht aufgeführt und nur Beispielhaft für obiges Teil gezeigt. In der technischen Dokumentation im Bereich AP 5 sind alle Zeichnungen mit Stücklisten hinterlegt.

Manche Teile sind eigengefertigt oder aus Zeitgründen in verlängerter Werkbank nach Zeichnung gefertigt und auf die Baustelle geliefert worden.

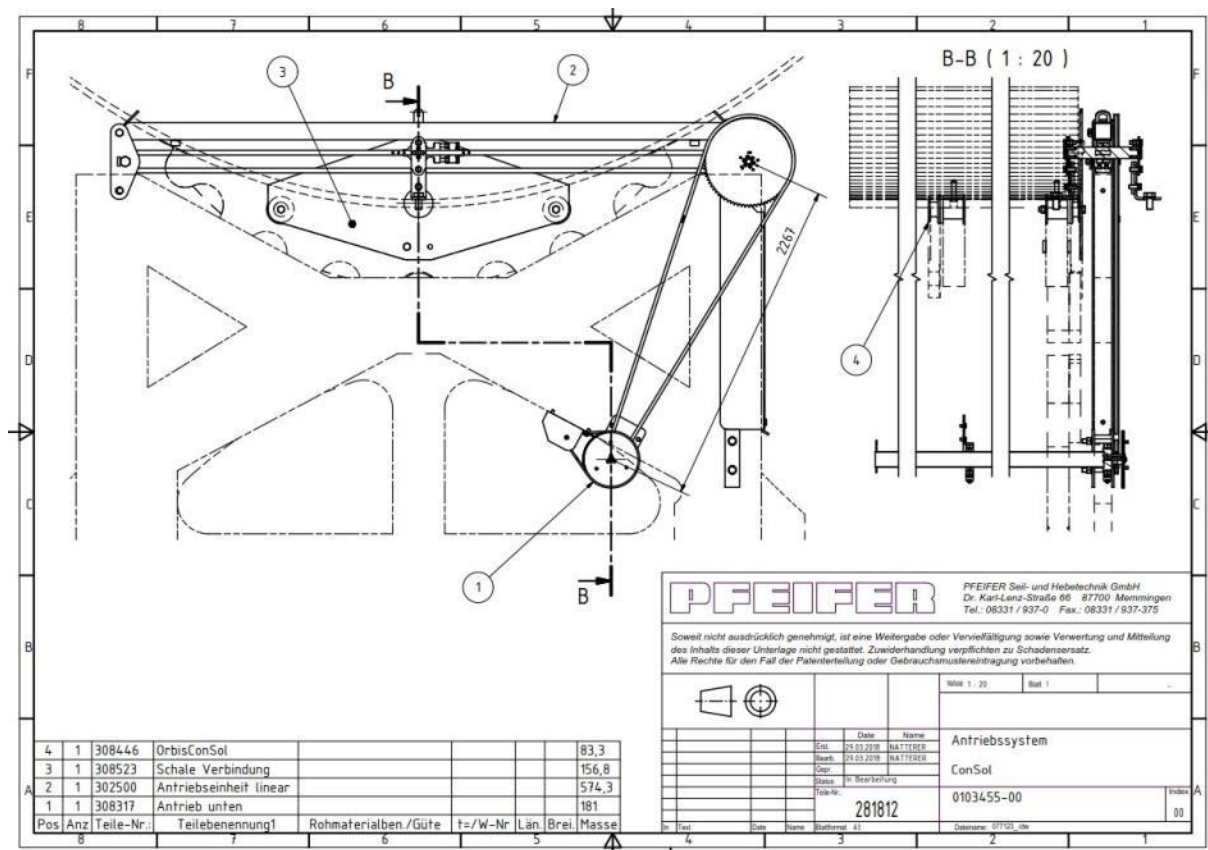


Abb 4.11.1 Antriebssystem in Zusammenstellungszeichnung mit vier Baugruppen

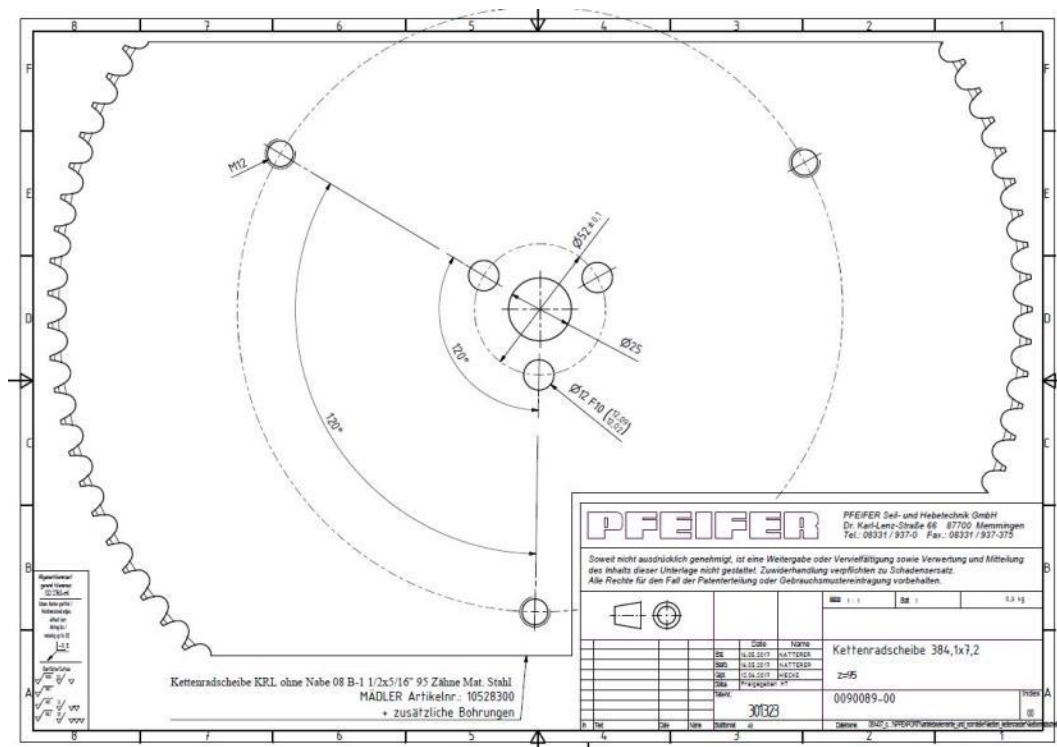


Abb. 4.11.2 typisches Normteil mit notwendiger Nachbearbeitung (Bohrungen)



## 12. Montage, Inbetriebnahme und Optimierung des Antriebssystems

Das Antriebssystem wurde im April 2018 auf der Baustelle montiert. Die sperrigen Bauteile wurden vorab mit Spedition auf die Baustelle geliefert. Kleinteile (auch der Getriebemotor) und Montagewerkzeug wurden vom Konstrukteur mit einem Monteur im PKW mitgeführt und dann in 2 Tagen montiert. Die „Antriebseinheit linear“ und die Verbindungsbleche an der Schale wurden zuerst auf den bereits im Fundament stehenden Antriebsbock und die Schale (Zahnräder stirnseitig an Schale) montiert. Ebenso wurde der Getriebemotor mit Torsionswelle montiert bevor die beiden Schalen auf die Abrollhügel gehoben wurden. Danach erfolgte die Montage der Verbindungswelle zwischen den Schalen mit dem Mitnehmer der Lineareinheit.

Am 3.Tag (nach Strom- und Steuerungsanschluß des Elektromotors) erfolgte die Inbetriebnahme mit der ersten Fahrt der Anlage. Siehe Kapitel 13



Abb. 4.12.1 Montage der „Antriebseinheit linear“ auf dem Antriebsbock



Abb. 4.12.2 Montage Getriebemotor mit Torsionswelle und Torsionswellenlager (schwarz)



Abb. 4.12.3 Montage Torsionswellenlager außen



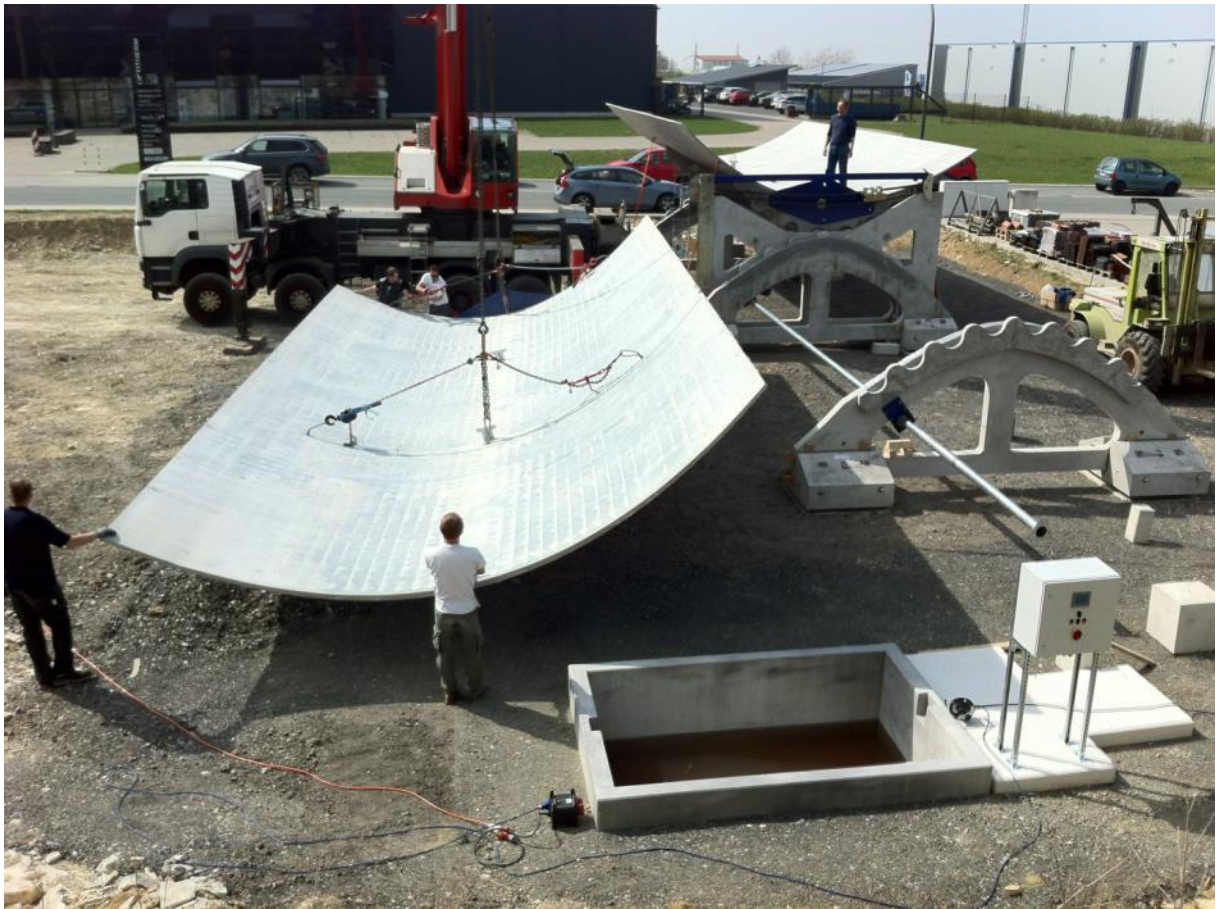


Abb. 4.12.4 die 2. Schale wird auf die Abrollhügel gehoben



Abb. 4.12.5 die 2. Schale wird auf die Abrollhügel gehoben



Abb. 4.12.6 Montage der Verbindungswelle zwischen den Schalenblechen mit dem Mitnehmer der Lineareinheit.



Optimierung nach 4 Wochen Einlaufphase: Das Spiel in der Kette wurde über die 4 Schrauben nachgestellt werden. Dazu wurde die Rinne so in eine Position (außerhalb Mitte) gefahren, in der die Schrauben gut zugänglich sind und die Kette beim Spanner schlaff ist. Dann wurden die Kontermuttern gelöst und die 4 Schrauben gleichmäßig angezogen bis die Kette spielfrei war.

## **13. Inbetriebnahme Montage und Testbetrieb des Demo-Kollektorsystems und mechanischer Betrieb**

Die mechanische Inbetriebnahme fand mehreren Schritten statt und wurde sofort nach Fertigstellung der jeweiligen Systemkomponenten durchgeführt. Folgende Überprüfungen haben stattgefunden und werden in den nächsten Unterkapiteln näher beschrieben:

- I. Überprüfung der Beweglichkeit des Kollektors
- II. Überprüfung der Beweglichkeit der REPA
- III. Inbetriebnahme der Pumpe, Überprüfung auf Dichtigkeit
- IV. Inbetriebnahme der Sonnenstandsnachführung

### **13.1 Überprüfung der Beweglichkeit des Kollektors**

Damit die einwandfreie Beweglichkeit des Kollektors überprüft werden konnte mussten zunächst alle Betonteile, der Antrieb und die Steuerungseinheit installiert werden. Mit diesen Komponenten war es dann möglich den Kollektor in eine gewünschte Position zu bewegen. Die Verbindung zwischen Steuerungseinheit, Antrieb und Halbschalen verlief ohne größere Probleme. Folgenden Auffälligkeiten traten auf:

#### **Rutschen der Halbschale**

Bei einer Auslenkung von ca.  $\pm 30^\circ$  von der Zenitposition begann der Kollektor ein Stück zu rutschen. Dies hatte zwei Ursachen:

1. Das Spiel zwischen den Zahnrädern (Sichel und Abrollhügel) war zu groß. Siehe Bild 14.1.1. Dies wurde behoben, indem ein Gummilager auf das Zahnrad des Abrollhügels geklebt wurde. Siehe Bild 13.1.2



**Bild 13.1.1 Spiel zwischen den Zahnradern**

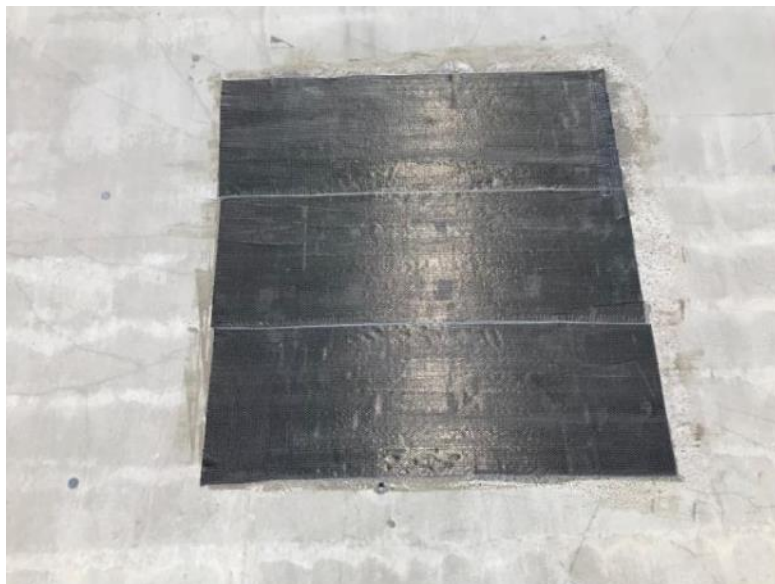


**Bild 13.1.2 Aufgeklebtes Gummilager**

2. Als der Kollektor auf eine maximale Auslenkung von ca.  $80^\circ$  gefahren wurde, kam es zu einem Durchstanzen der Sichel in die Schale (siehe Bild 14.2.1), d.h. die Integrität der Schale war somit nicht mehr gewährleistet. Grund hierfür war in jedem Fall das zu klein ausgeführte Krafteinleitungsblech zwischen Schale und Sichel. Ein weiterer Grund könnte das zuvor beschriebene Rutschen innerhalb der Zahnräder gewesen sein, weil es dadurch zu bereits erhöhten Kräften auf die Schale gekommen sein kann. Nach der Begutachtung des zuständigen Prüfstatikers wurde entschieden, die betroffenen Stellen mit einer mehrlagigen Kohlefaserlaminierung zu verstärken (siehe Bild 14.2.2).



**Bild 13.2.1 Risse der Schale verursacht durch Durchstanzen**



**Bild 13.1.3 Reparatur der Halbschale mit Kohlefaserlaminierung**

## **13.2 Überprüfung der Beweglichkeit der REPA**

Die Beweglichkeit der REPA hat keine Auffälligkeiten gezeigt. Die Kugelgelenke haben sich leicht drehen lassen. Dies ist vor allem auf den großen Hebelarm zurückzuführen. Bild 14.3.1 zeigt den ausgelenkten Kollektor mit REPA.



**Bild 13.2.1 Ausgelenkte REPA**

### **13.3 Inbetriebnahme der Pumpe, Überprüfung auf Dichtigkeit**

Die Inbetriebnahme der Pumpe verlief ohne Probleme. Es sind keine Undichtigkeiten an der Rohrleitung aufgefallen.

### **13.4 Inbetriebnahme der Sonnenstandsnachführung**

Die Sonnenstandsnachführung funktioniert einwandfrei. Bild 14.4.1 zeigt den Kollektor im Nachführmodus mit Sonnenreflektion auf dem Receiverrohr. Die Genauigkeit ist auch an dem zentralen Schattenwurf in der Mitte der Halbschale zu erkennen.



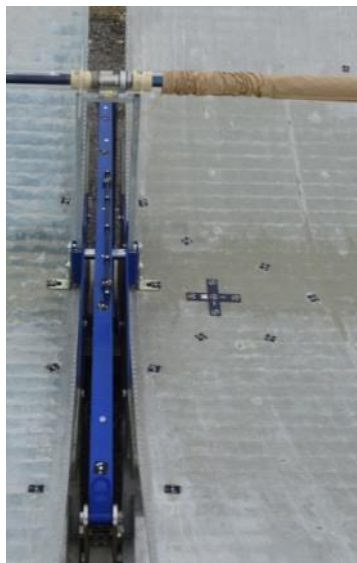
**Bild 13.4.1 Fokussierung des Kollektors**

## **14. Messkampagne zur optischen Qualifizierung des Demonstratormoduls**

Die Messkampagne zur optischen Qualifizierung des Demonstratormoduls mittels Nahbereichsfotogrammetrie wurde am 24. und 25. April 2018 durchgeführt. Dieser Zeitpunkt (zu dem der Konzentrator noch unbespiegelt war) und diese Messmethode wurden gewählt, da

das Hauptaugenmerk auf der Formgenauigkeit und Verformung der Betonhalbschale unter Eigengewicht lag. Im Rahmen dieser photogrammetrischen Vermessung wurde:

- Der Konzentrator mit retroreflektierenden Zielmarken bestückt (codierte Targets zur Bildorientierung und nicht codierte Targets für Messpunkte), s. auch Abbildung 4.14.1;
- Mittels eines Teleskopgelenkmasts zahlreiche Messbilder aus dem Halbraum über dem Objekt aufgenommen;
- Die Bilderkennung der Zielmarken und die Orientierung der Messbilder durchgeführt;
- Die 3D-Koordinaten der Messpunkte mittels Bündelausgleichsrechnung durch einen Optimierer ermittelt, die Darstellung der Messpunkte befindet sich in Abbildung 4.14.2.



**Abbildung 4.14.1: Kollektorausschnitt mit Zielmarken, Referenzkreuz und Sklaierstangen**

Im Postprocessing wurde die 3D-Koordinaten skaliert, manuelle Korrekturen durchgeführt, Artefakte entfernt und die Zielgrößen Höhen- und Steigungsabweichung (im Vergleich zur idealen Parabelgeometrie) abgeleitet.



**Abbildung 4.14.2.: Übersicht über Messpunkte auf beiden Kollektorhalbschalen, an Receiverern und hochaufgelösten Parabelschnitten**

Zur Berechnung der Abweichungen von der idealen Parabelgeometrie wird eine Ausgleichs- parabel bzw. Parabolrinne durch die ermittelten Koordinaten gelegt und mit der Idealgeometrie verglichen. Die Messung und Auswertungen erfolgen in zwei Messpositionen:

- Zenith: Konzentrator senkrecht nach oben geöffnet
- Horizont: Konzentrator gen Horizont geöffnet (in diesem Fall der Ost-West-Aufstellung und Vermessung entspricht die gewählte maximale Horizontposition einem Winkel von  $19,45^\circ$  über dem Horizont in Südrichtung)



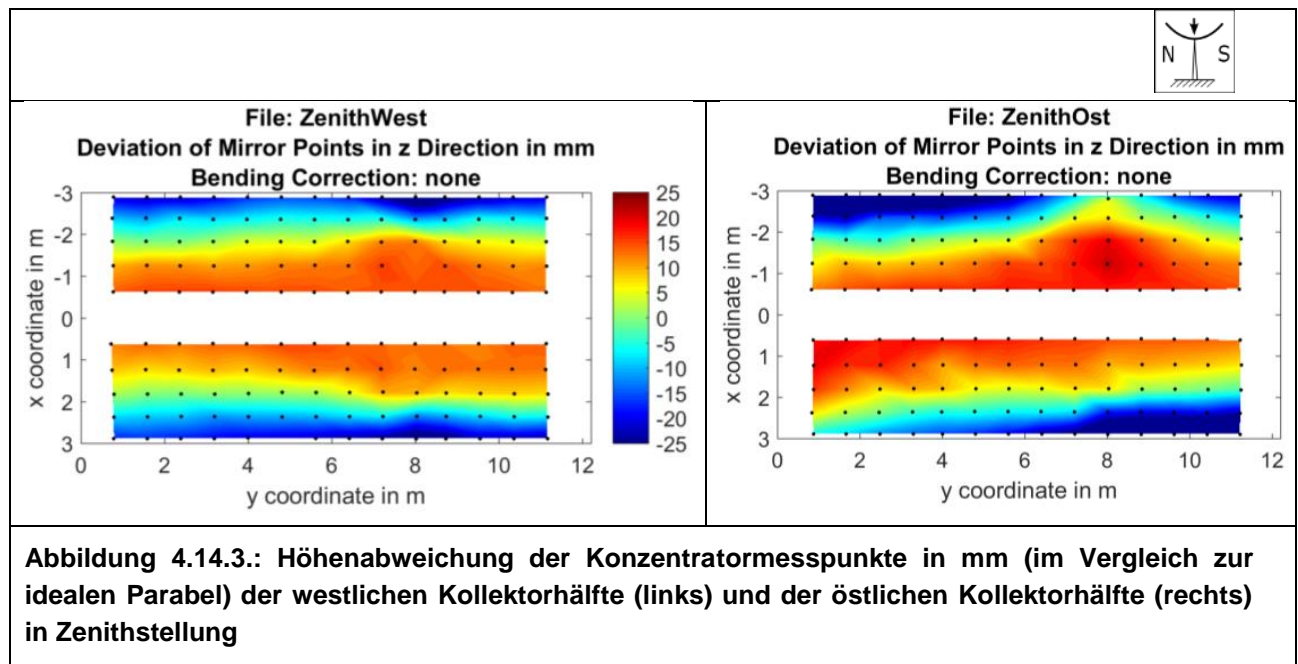
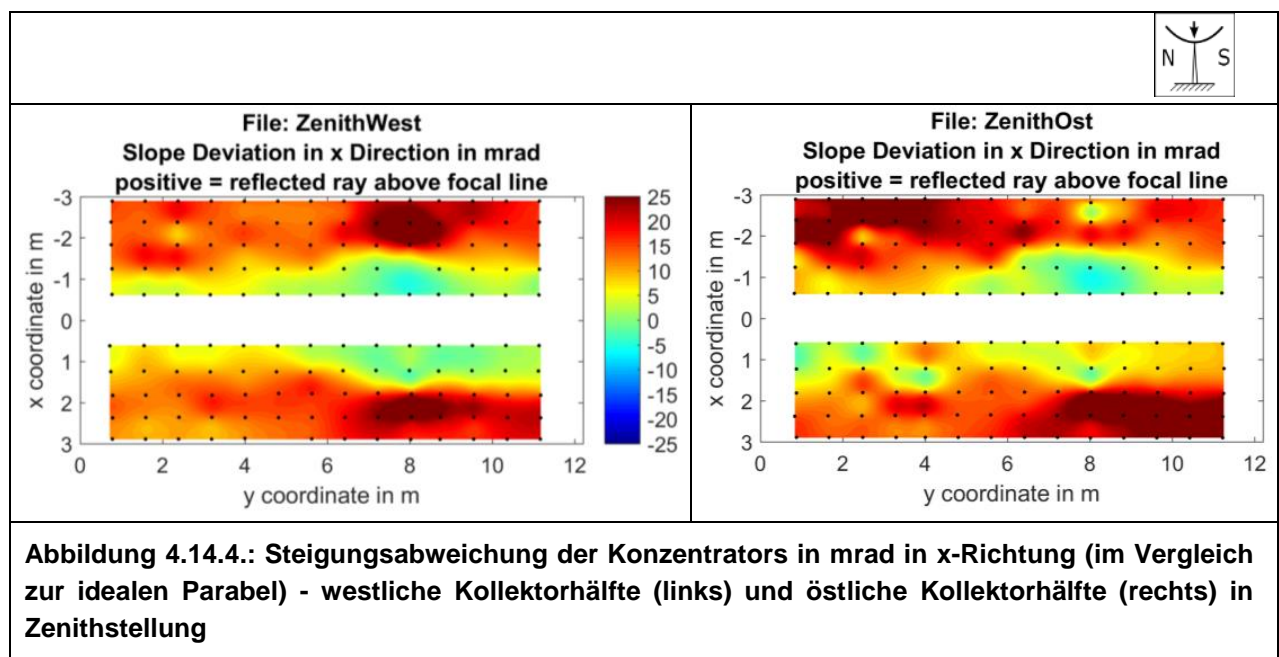


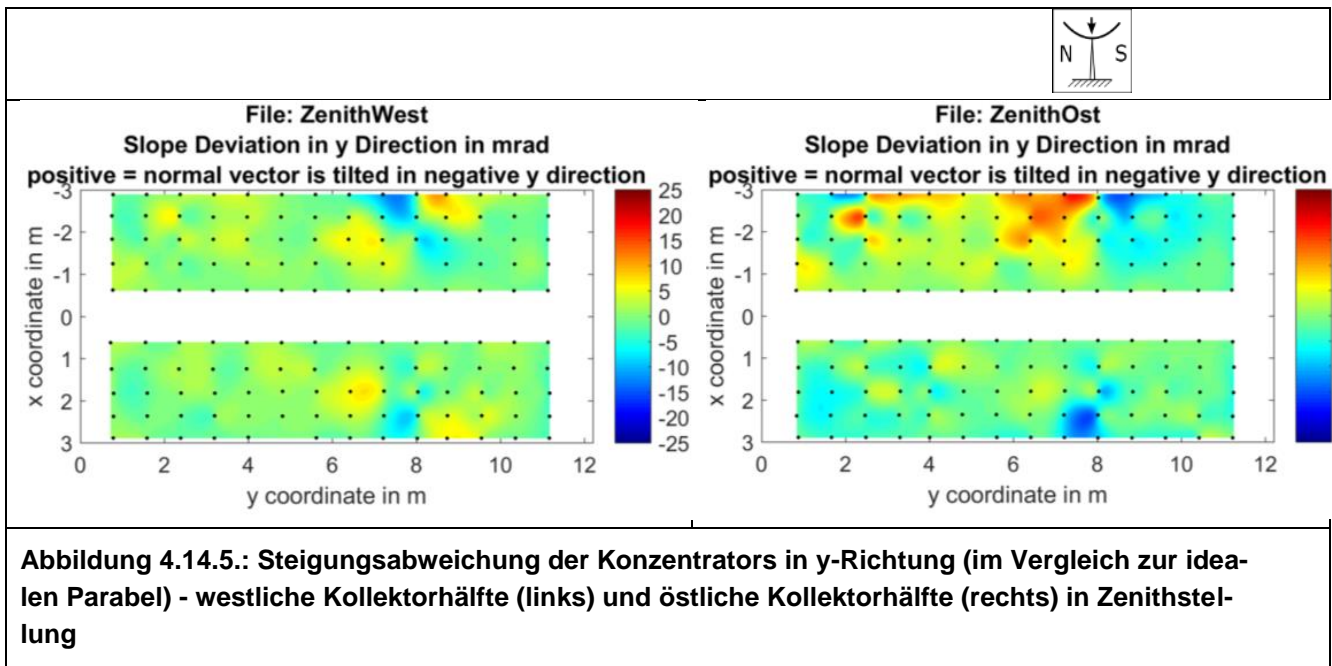
Abbildung 4.14.3 zeigt systematische Höhenabweichungen der Rasterpunkte in Abhängigkeit von der Position in x-Richtung: in Scheitelnähe ist der Konzentrator zu hoch und an den äußeren Kanten zu flach. Mögliche Ursachen hierfür können sowohl in der Abformung beim Guss, in Kriech-, Setz- und Schrumpfprozessen beim Aushärten des Betons als auch in der Verformung durch Eigengewicht aufgrund mangelnder Steifigkeit liegen.



Die in Abbildung 4.14.4 dargestellten Steigungsabweichungen des Konzentrators in x-Richtung folgen unmittelbar aus dem Verlauf der Höhenabweichung in x-Richtung (Abbildung 4.14.3). Im Vergleich zur Sollform ergibt sich eine Ausgleichsparabel die systematisch weiter aufgeweitet als das Design ist, daraus folgt eine Steigung, die systematisch zu gering ist und damit eine Reflexion und Konzentration der einfallenden Strahlung oberhalb des Designposi-

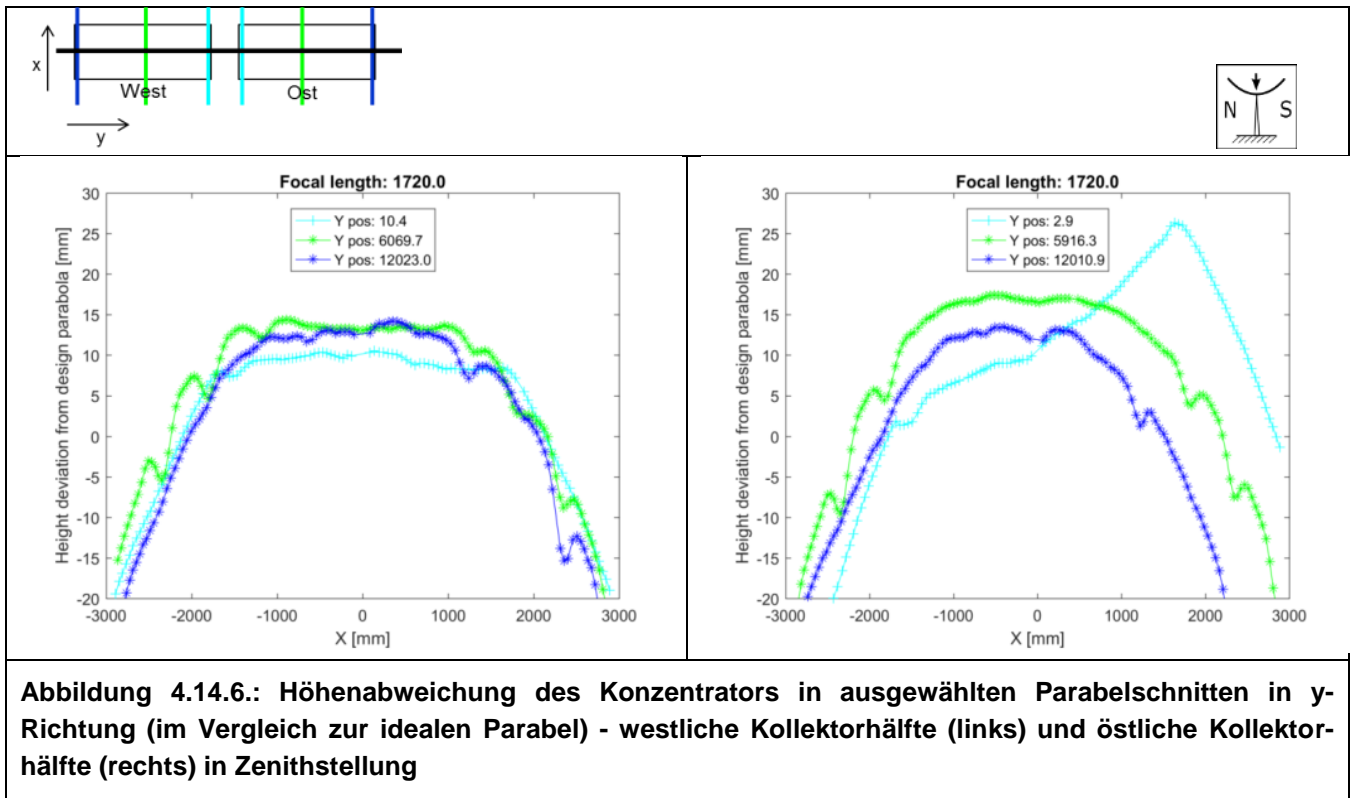
on des Absorberrohrs. Der hier beobachtete Effekt ist mehr als doppelt so groß wie bei konventionellen Designs. Sogar mit einer Skala von -25 bis 25 mrad (im Gegensatz zu typischen -10 bis 10 mrad) lassen sich lokale Auffälligkeiten nicht komplett auflösen. Die für diese Geometrie maximal tolerierbare Abweichung von -5 bis 5 mrad wird in weiten Bereichen deutlich überschritten.

Der daraus resultierende geometrisch bedingte Fokussiergüte (Intercept) ist untauglich für die Verwendung in Parabolrinnenkraftwerken, nähere Betrachtungen und Abhilfemaßnahmen hierfür werden in Abschnitt 15 beschrieben.



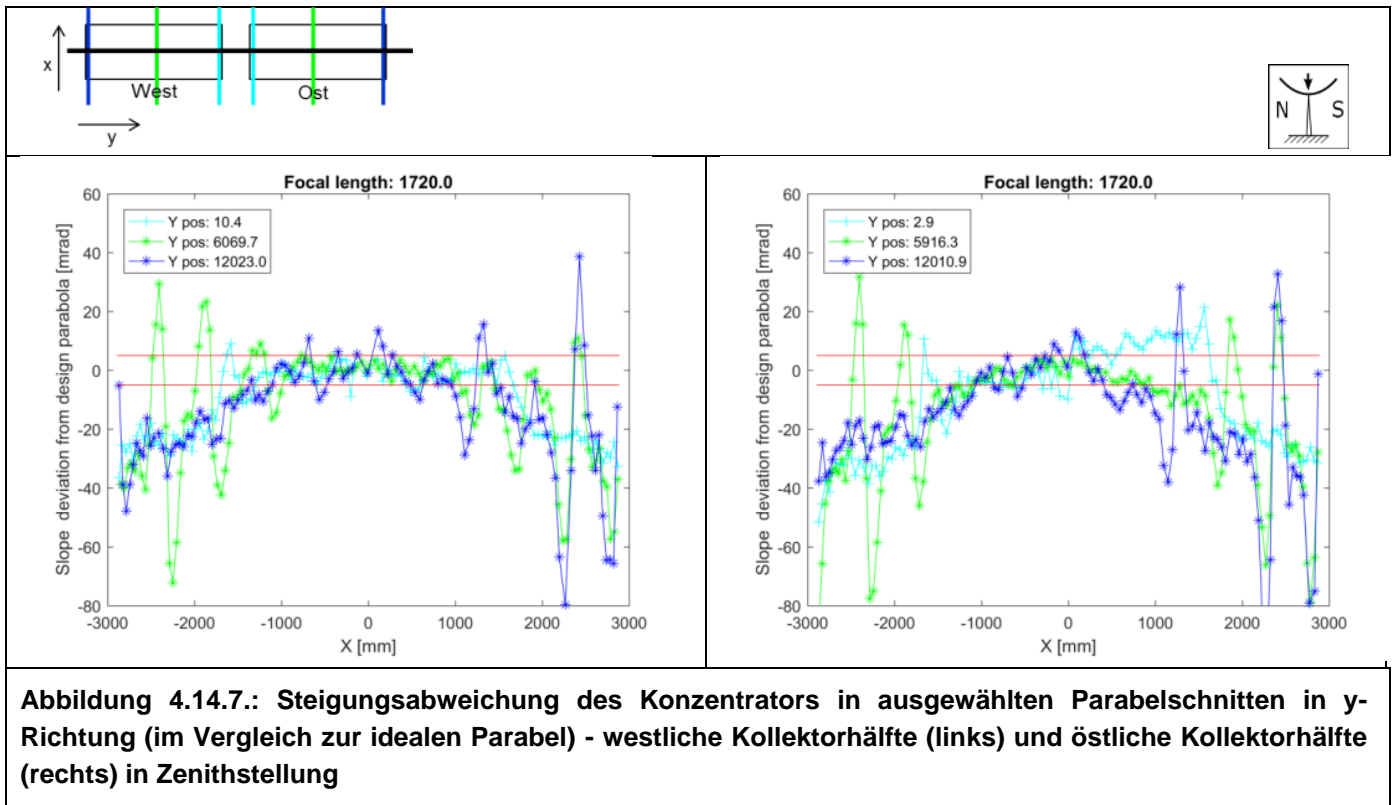
Die in Abbildung 4.13.5 dargestellten Karten der Steigungsabweichung zeigen, dass diese in weiten Bereichen im Rahmen der üblicherweise tolerierbaren Werte beläuft. Insbesondere in der östlichen Kollektorstrecke treten einige lokale Auffälligkeiten auf, diese fallen aber mit auch makroskopisch sichtbaren Auffälligkeiten / Fehlern zusammen und sind so erklärbar. Insgesamt kann aus den Ergebnissen für die Steigungsabweichung in y-Richtung geschlossen werden, dass die Rippen unter der Gussform gut platziert und steif genug waren.





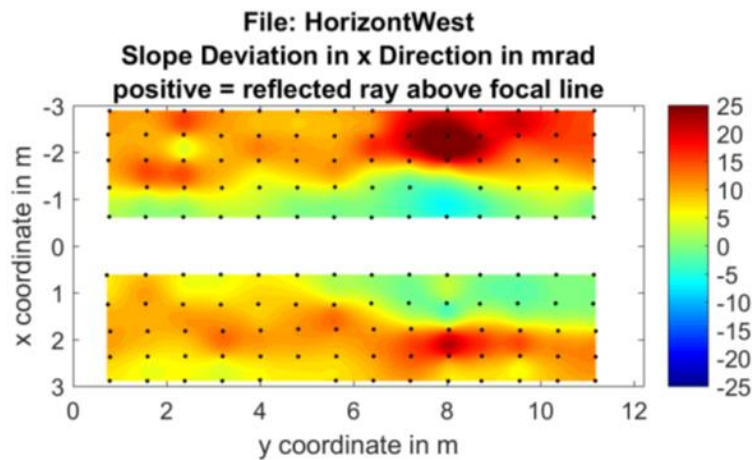
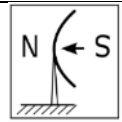
Die hochaufgelösten Parabelschnitte in Abbildung 4.14.6 zeigen insgesamt die gleichen Tendenzen in Höhen- und Steigungsabweichungen wie die flächig verteilten Rasterpunkte in der vorangestellten modulweisen Betrachtung. Diese sind überlagert mit symmetrischen Mustern (sichtbar als „Dellen“ im Kurvenverlauf) wie sie schon bei der Vermessung des Testmoduls festgestellt wurden. Auch hier werden die tolerierbaren Abweichungen von  $\pm 5$  mrad deutlich überschritten. Die lokalen Abweichungen weiterhin aller Wahrscheinlichkeit nach von der Verschraubung der Holzteile der Gussform und dabei lokal aufgebrachten Kräften und Verformungen. Entsprechende erarbeitete Gegenmaßnahme scheinen damit nicht die erhoffte Wirksamkeit gezeigt zu haben. Diese Erfahrung sollte in die Entwicklung einer Gussform für eine Serienproduktion einfließen, auch wenn der Effekt bei Verwendung einer metallischen Form möglicherweise etwas schwächer ausgeprägt sein könnte.

Auffällig ist der Höhenverlauf insbesondere des Parabelschnitts des Westmoduls am Antrieb, hier liegt eine deutliche Abweichung von der Sollform vor, die möglicherweise auf die Probleme beim Guss dieser Halbschale zurückgeführt werden kann und als Ausreißer nicht näher untersucht wurde.



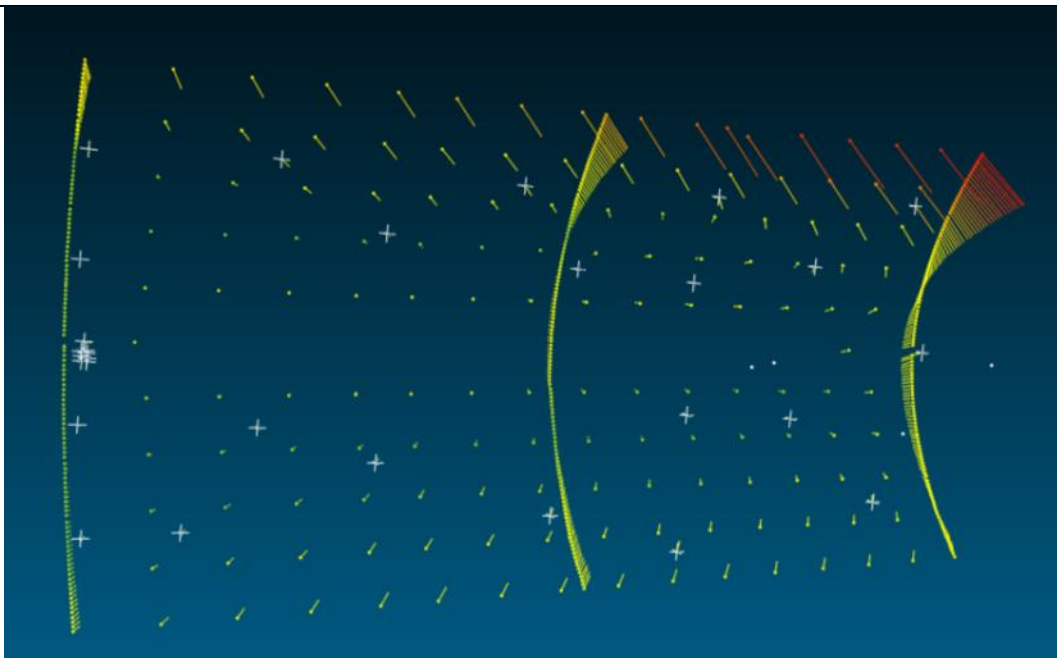
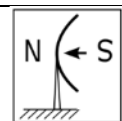
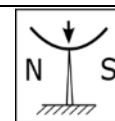
Die aus den Photogrammetriemessungen abgeleiteten Receiverpositionen zeigen, dass die Receiver in Zenithstellung entsprechend der Design Fokallänge von  $f=1720\text{mm}$  zumeist gut positioniert sind. Die zulässige Toleranz in x-Richtung von  $\pm 5\text{mm}$  wird weitestgehend eingehalten.

Die Ergebnisse der photogrammetrischen Vermessung in der Horizontposition sind denen in der Zenithposition prinzipiell sehr ähnlich, so dass sie im Folgenden verkürzt dargestellt werden. Der Hauptunterschied liegt darin, dass die Schwerkraft hier unterschiedlich auf die beiden Parabelhälften wirkt: Eine Verformung in Richtung Boden kompensiert bei der oberen Hälfte die Aufweitung zumindest teilweise, während dies bei der unteren Hälfte nicht der Fall ist. Entsprechende leichte Asymmetrien sind sowohl in den Höhen- als auch in den Steigungsabweichungen insbesondere in den hochaufgelösten Parabelschnitten erkennbar.



**Abbildung 4.14.8.: Steigungsabweichung der Konzentrators in x-Richtung (im Vergleich zur idealen Parabel) der westlichen Kollektorhälfte in Horizontstellung**

Wie aus Abbildung 4.14.8 ersichtlich ist, ist die Parabel auch in Horizontstellung zu weit geöffnet, wenn auch etwas weniger stark ausgeprägt als in Zenithposition: Gleichzeitig weist dieser Unterschied auf ein Mangel in der Steifigkeit im Parabelquerschnitt hin.



**Abbildung 4.14.9.: Verformung des Konzentrators bei Bewegung von Horizont in Zenithposition am Beispiel der westlichen Kollektorhälfte, maximale Verformung von 30 mm (rot)**

Die sich aus dem Vergleich von Horizont und Zenithstellung ergebende Verformungsanalyse zeigt eine deutliche Deformation des Konzentrators und ist in Abbildung 4.14.9 exemplarisch für die westliche Kollektorhälfte dargestellt. An den Ende und oberen Außenkanten treten maximale Verformungen von bis zu 30mm auf, die einem Zusammen/Auseinanderklappen der Parabel entsprechen und auf mangelnde Steifigkeit hinweisen.

Mit Hilfe der photogrammetrischen Vermessung war eine hochgenaus Vermessung eines relativ groben Rasters an Hauptzielmarken möglich, die einen guten Überblick über Gesamtgeometrie der unbespiegelten Kollektorhalbschalen vermittelt. Aussagen zwischen Punkten sind nur im Rahmen von Interpolation bzw. auf hochaufgelösten Parabelschnitten möglich. Letztere weisen bestätigen aber allgemeine Tendenzen.

Die vorhandenen Ergebnisse vermitteln einen guten Eindruck der Hauptherausforderungen bei der formtreuen Fertigung von Parabolrinnenkollektoren mit Konzentratoren aus Betonhalbschalen, die aus Sicht der optischen und mechanischen Eigenschaften in der Abbildung der Parabelform mit gewünschter Fokallänge und der Reduktion der Verformung unter Eigenlast liegen. Flächig hochaufgelöste Daten des Gesamtkonzentrators (Schale, Reflektor und Absorberrohr) und genauere Ermittlung des effektiven Intercepts sind mittels Deflektometrie möglich und für fortgeschrittenere Prototypen und Stichproben aus Serienfertigungen anzustreben.

## 15. Abschätzung des optischem Wirkungsgrads, Interpretationen und Optimierungspotential

Auf Basis der vorliegenden relativ grob aufgelösten Geometriedaten aus der photogrammetrischen Vermessung des Konzentrators ist eine hochaufgelöstes Raytracing zur Ermittlung der Kollektorintercepts und optischen Wirkungsgrads nicht sinnvoll. Stattdessen wurde diese Werte mittels statistischer Methoden nach Rabl ermittelt.

Neben der mittleren quadratischen Abweichung des Werts der Kollektorsteigung RMS (Sdx), der sich aus der obigen Auswertung der Photogrammetrie-Messungen ergibt, werden hier bei senkrechter Einstrahlung zusätzlich Trackingfehler, Absorberrohrfehlpositionen, Spekularitätsdefizite und die Sunshape berücksichtigt. Im vorliegenden Fall ist die Abweichung der Kollektorsteigung allerdings der dominante Effekt für die Defizite im resultierenden Intercept. Die Ergebnisse für die beiden Kollektorhälften sind in Tabelle 14.1 dargestellt

**Tabelle 14.1: Mittels statistischer Methoden abgeschätzte Interceptwerte und optische Wirkungsgrade für den Consol Demonstrator in unterschiedlichen Messpositionen und Fokallängen.**

Kollektorhälfte	Messposition	Fokallänge in mm	RMS (Sdx) in mrad	Intercept in %	Optischer Wirkungsgrad in %
Ost	Zenith	1720	15.93	40,2	37,1
West	Zentih	1720	13.63	46,1	42,5
Ost	Zenith	1780	6.78	76,2	70,3

West	Zenith	1780	5.29	85,6	78,9
West	Horizont	1720	10.12	58,6	54,0
West	Horizont	1780	6.55	77,6	71,5

Erwartungsgemäß lässt sich entsprechend der PG Ergebnisse durch Verschiebung des Absorberrohrs entlang der Symmetrieachse der Parabel - also eine Anpassung der Receiverposition an die effektiv größere Fokallänge des Kollektors - eine deutliche Steigerung des Intercepts erreichen. Für den vorliegenden Fall wäre eine etwa 60mm höhere Absorberposition optimal. Da Standard-Receiverstützen allerdings typischerweise nicht in dieser Größenordnung justierbar sind, kann diese Änderung, die den Wirkungsgrad des Demonstrators nahezu verdoppeln würden nicht mit einfachen Mitteln durchgeführt werden.

Allerdings bleibt der Kollektor selbst mit dieser Anpassung noch deutlich unter den in kommerziellen Designs angestrebten 98% Intercept, da über die systematische Aufweitung hinaus noch weitere lokale Abweichungen in der Form und Steigung vorliegen. Auch wird hier deutlich dass sich die Qualität der beiden Hälften deutlich unterscheidet. Im Hinblick auf die Formgenauigkeit ist die als zweites gefertigte Westhälfte deutlich besser als die Osthälfte, weil sie weniger und weniger deutliche Fehlbereiche aufweist.

Der optische Wirkungsgrad ist bei senkrechter Einstrahlung in erster Näherung proportional zum Intercept und berücksichtigt den Reflektionsgrad des Spiegelmaterials, sowie den Transmissionsgrad der Glashüllrohre und den Absorptionsgrad der Absorberrohre.

# ConSol

## Concrete Solar Collector

### Bericht AP 5

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Förderbekanntmachung des BMU  
zum 6. Energieforschungsprogramm vom 13.12.2011

Förderkennzeichen: FKZ A-G

Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 31.05.2018

Projektpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Almeico GmbH

Solarlite CSP Technology GmbH

Technische Universität Kaiserslautern

Ruhr-Universität Bochum

Stanecker Betonfertigteilewerk GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1. Dokumenthistorie .....	3
2. Einführung.....	3
3. Simulation der zeitlichen Verformungen .....	3
4. Verschleißuntersuchung von industriell hergestelltem Spiegelmaterial.....	5
5. Entwicklung alternativer Tragstrukturen.....	7
6. Numerische Umsetzung und Optimierung .....	8
7. Visuelle und technische Aufbereitung der jeweiligen Designmodelle .....	10
8. Untersuchung im Labor oder/und in situ, welche Materialien wie lange welchen Widerstand bieten .....	13
9. Technische Dokumentation Antrieb: Bedienungsanleitung, Gefährdungsanalyse, ggf. Baumusterprüfung, Technische Dokumentation, Konformitätserklärung/CE Zeichen .....	14
10. Simulationsrechnungen zur Abschätzung der zu erwartenden Jahreserträge und LEC	15
11. Bestimmung der Auswirkungen durch Formfehler oder Reflektivitätsverluste auf die Stromgestehungskosten über Jahresertragsberechnungen.....	18
12. Konzeptionierung alternativer Tragstrukturen (ca. 6x12m) für verklebte (Folie) und verbundorientierten Lösungen (Aluminium o.ä.) der Verspiegelung.....	18



## 1. Dokumenthistorie

Version	Datum	Ersteller	Beschreibung
1	12.07.2018	Dirk Krüger	Einleitung, Überarbeitung
2	12.07.2018	Timo Zippler	Kap. 10
3	13.07.2018	Dr. Dasbach	Kap. 4
4	14.07.2018	Dr. Forman	Kap. 3, 5, 6, 7
5	17.07.2018	Forman	Kap. 3, Ergänzungen
6			

**Tabelle 1-1: Dokumenthistorie**

## 2. Einführung

Dieser Bericht dokumentiert Ergebnisse des AP 5.

Ein Schwerpunkt dieses AP behandelt die Optimierung der Kollektorstruktur zur Verringerung des Beton- und Bewehrungsanteils. Verschiedene Konzepte werden vorgestellt und ihre Auswirkungen diskutiert auf Basis numerischer Untersuchungen. Eine Materialreduktion von ca. 50% ist möglich über schlankere Strukturen bei gleichzeitig erhöhter Formstabilität.

Die Degradation der im Projekt entwickelten Spiegel wurde untersucht für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken.

Insbesondere für den Betrieb des Prototypen wurde eine Bedienungsanleitung und eine umfassende technische Dokumentation des Antriebs erstellt.

Schließlich werden die zu erwartenden Jahreserträge eines Kollektors basierend auf den Ergebnissen aus der Fotogrammetrie der beiden gebauten Kollektormodule ermittelt. Die Berechnungen zeigen, dass die LEC für ein Kraftwerk mit Andasol Layout mit den Investitionen und dem Wirkungsgrad des ConSol Kollektors bei etwa 21,93 €/ct/kWh liegen. Im Vergleich dazu liegen die LEC des Andasol Referenzkraftwerks bei 19,0 €/ct/kWh.

## 3. Simulation der zeitlichen Verformungen

Zeitliche Verformungen sind maßgeblich dauerlastabhängige Kriechverformungen. Üblicherweise besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Eigenlast und der Kriechverformung. Nach dem Superpositionsprinzip entspricht die Kriechverformung somit einer Überhöhung der Verformung aus Eigenlast um den additiven Faktor  $\varphi$  (Endkriechzahl). Da jedoch der Kollektor der Sonne nachgeführt wird, besteht – außer in Ruheposition – kein ständiger Eigenlastfall, sodass sich ein über den Tag veränderlicher Spannungszustand im Bauteil einstellt. Daher wurde für unterschiedliche Annahmen von Sonnengangverteilungen mit Ruhe-

position in der Nacht eine über den Tag gemittelte Verformung unter Eigenlast bestimmt. Die angesetzten Verteilungen sind in Abbildung 5.3.1 dargestellt.

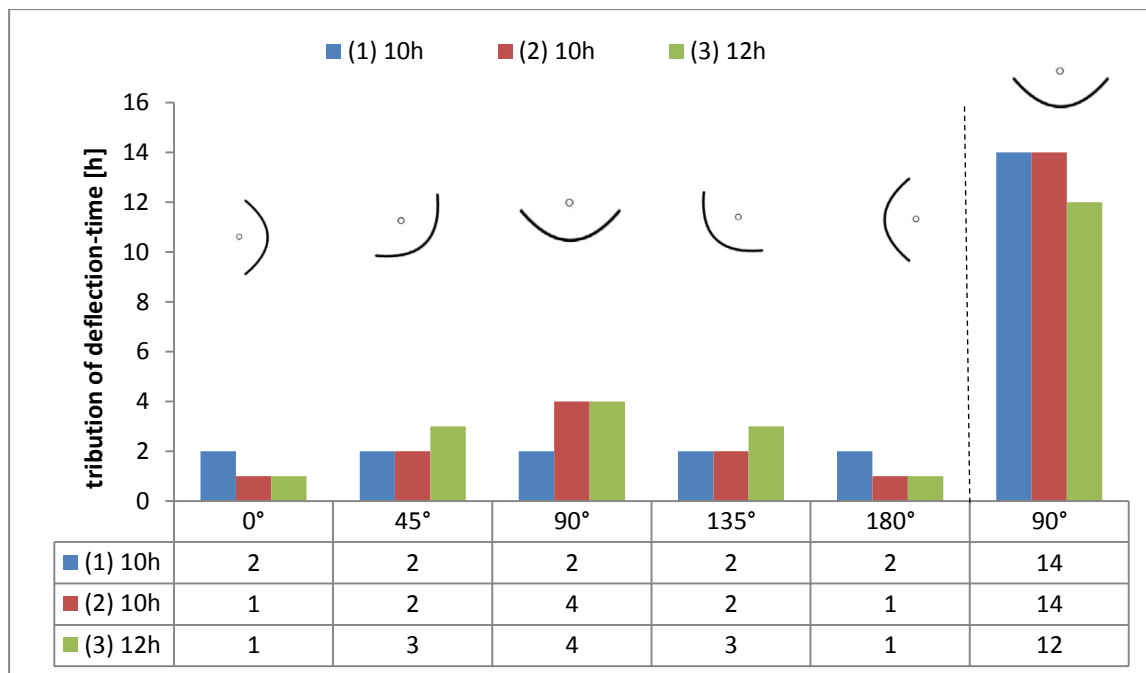


Abbildung 5.3.1: Unterschiedliche Ansätze von Sonnengangverteilungen

Die so über den Tag bestimmte, gemittelte Verformung kann dann in Verhältnis zur Verformung in Ruheposition unter Eigenlast gesetzt werden, um einen effektive Kriechverhältniswert für die gegebene Sonnengangsszenarien zu ermitteln. Diese variieren für die Ansätze nach Abbildung 5.3.1 zwischen 0,78-0,83. Darauf basierend wurde die Verformung für den maßgebenden Verformungslastfall (vgl. AP 1.1.1, Abbildung 5.3.2 (links)) um die effektive Kriechverformung - in Abhängigkeit des Kriechverhältnisbeiwerts und der Endkriechzahl von NANODUR ( $\varphi=0,60$ ) - erhöht. Zur Bestimmung der Wirksamkeit bei abgeschlossenen zeitlichen Verformungen (Zeitpunkt  $t=\infty$ ) infolge Kriechen wurde der Steigungsfehler  $SD_x$  ermittelt (Abbildung 5.3.2 (rechts)). Es zeigt sich für den quadratischen Mittelwert  $SD_{x,rms}$  ein Anstieg von ca. 0,8 mrad.

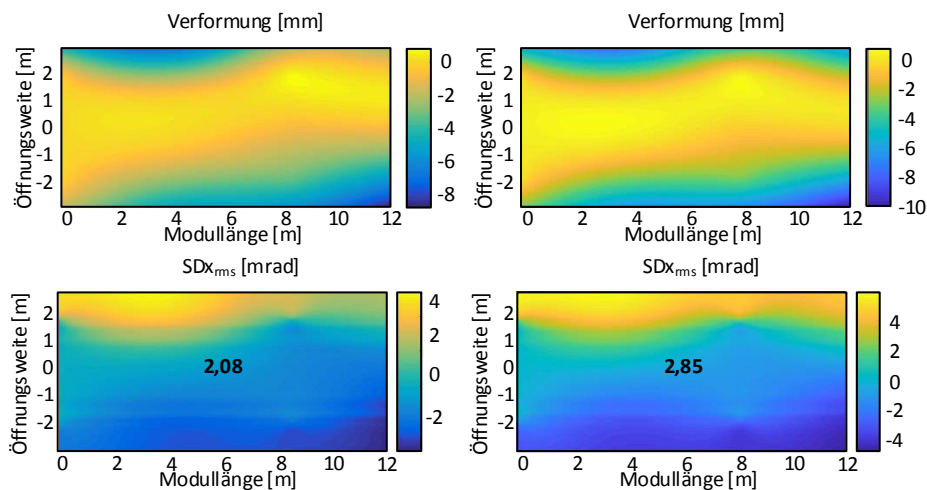


Abbildung 5.3.2: Verformung und zugehöriger Steigungsfehler zum Zeitpunkt  $t=0$  (links) und zum Zeitpunkt  $t=\infty$ , also mit abgeschlossenen, zeitlichen Verformungen (rechts)

## 4. Verschleißuntersuchung von industriell hergestelltem Spiegelmateriale

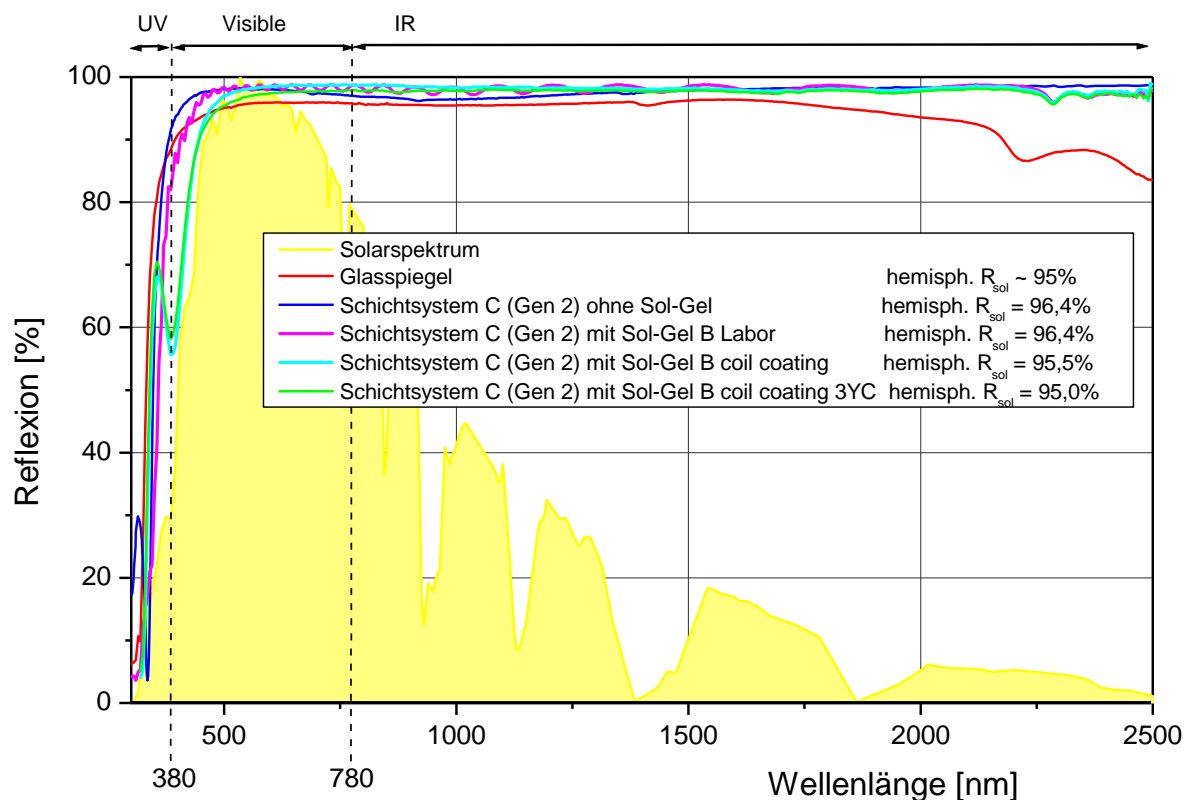
Für die Abschätzung der Lebensdauer des neu entwickelten Reflektormaterials wurde das Silber basierte Schichtsystem Gen 2C nun vollständig industriell hergestellt. D. h. sowohl die elektrochemische Politur und die Anodisierung des Aluminiumsubstratmaterials, die PVD Beschichtung und das Aufbringen des Sol-Gel Systems B wurde auf industriellen Bandbeschichtungsanlagen durchgeführt. Dies entspricht der endgültigen industriellen Fertigung des neuen Reflektormaterials.

Zunächst wurden die Reflexionseigenschaften des industriell hergestellten Spiegelmateriale im Neuzustand vermessen.

Auffällig ist, dass das Reflexionsspektrum des Materials (siehe Grafik 5.4.1), bei dem die Sol-Gel Schicht mit der industriellen Bandbeschichtungsanlage aufgebracht wurde im Gegensatz zu dem im Labor mit Sol-Gel beschichteten Material keine Interferenzen aufweist. Nur um 380nm ist eine Veränderung des Reflexionsspektrums zu erkennen. Eventuell tritt hier eine stärkere Streuung in der Sol-Gel Schicht auf. Da keine Interferenzen erkennbar sind, ist auch eine optische Bestimmung der Schichtdicke der aufgetragenen Sol-Gel Schicht schwierig. Während der Beschichtung wurde mittels Wirbelstromverfahren eine Schichtdicke von etwa 2 - 3µm gemessen.

Die erreichte solare Reflexion ist im Falle der industriellen Sol-Gel Beschichtung etwa 1% geringer wie bei den im Labor beschichteten Proben. D. h. hier besteht noch ein Bedarf zur Optimierung der industriellen Sol-Gel-Beschichtung.

Auf der anderen Seite ist die gerichtete Reflexion des industriell Sol-Gel beschichteten Spiegelmateriale höher (siehe Tabelle 5.4.1).



**Grafik 5.4.1: Reflexionsspektren des Silber-basierten Reflektorschichtsystems mit Sol-Gel Schicht, die einmal im Labor und zum anderen mit der industriellen Bandlackierungsanlage aufgebracht wurde.**

Um zu untersuchen, ob es Qualitätsunterschiede zwischen der im Labor und der industriell aufgetragenen Sol-Gel Schicht gibt, wurden zwei Proben des industriell beschichteten Materials ebenfalls dem 3Y Coastal Degradationstest unterzogen.

Gemessene Reflexion im Neuzustand und nach 3Y Coastal Test in %								
Probe	method	sol-gel	$\rho_{s,h}([280,2500],8^\circ,h)$			$\rho_{\lambda,\varphi}(660nm,15^\circ,12.5\text{ mrad})$		
			neu	nach 3YC	$\Delta$	neu	nach 3YC	$\Delta$
Gen 2 C #34	Labor	B	96,50	94,20	-2,30	90,30	74,40	-16,00
Gen 2 C #34 - 1	Industriell	B	95,50	95,00	-0,50	92,20	82,50	-9,40
Gen 2 C #34 - 2	Industriell	B	95,50	94,90	-0,60	91,90	78,90	-13,30

**Tabelle 5.4.1: Vergleich der Ergebnisse der "3Y Coastal" Testprozedur der im Labor und auf einer industriellen Bandlackieranlage mit Sol-Gel beschichteten Proben.**

In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der "3Y Coastal" Testprozedur der im Labor und auf einer industriellen Bandlackieranlage mit Sol-Gel beschichteten Proben eingetragen. Man erkennt, dass die industriell mit Sol-Gel beschichteten Proben weniger als die im Labor beschichteten Proben im 3Y Coastal Test degradieren.

Somit ist der Schutz der industriell aufgetragenen Sol-Gel Schicht besser, als bei der im Labor aufgetragenen Sol-Gel-Schicht. Damit ist zu erwarten, dass auch die anderen Schichtsysteme der Generation 2 und 3 eine geringere Degradation zeigen, wenn die Sol-Gel Beschichtung auf einer industriellen Bandbeschichtungsanlage aufgetragen wird.

Ein Ziel des Verbundprojektes war es, ein neues Reflektormaterial zu entwickeln, das eine mit Glasspiegeln vergleichbare Reflexionsleistung besitzt und mindestens über 10 Jahre unter den für Solarspiegel typischen Umweltfaktoren langzeitstabil ist.

Zwei der Generation 2 Schichtsysteme sind nach den Alumir Degradationstests zumindest unter „Desert“ Bedingungen noch nach 10 Jahren einsetzbar, womit das Projektziel erreicht wurde. Bei dem besseren der beiden Materialien beschränkte sich der Abfall des gerichteten Reflexionsgrades auf 2,9 ppt (siehe AP 1.3.7). Vor allem stellen die Ergebnisse sehr deutliche Verbesserungen zu den vor dem Projekt erhältlichen Aluminium-basierten Materialien dar.

Drei der Generation 3 Schichtsysteme sind im 3Y Coastal Test nochmals signifikant stabiler als die Generation 2 Schichtsysteme, so dass zu erwarten ist, dass diese auch im 10Y Desert Test besser abschneiden als die Generation 2 Schichtsysteme.

Wenn man somit unter Desert Bedingungen von einer Abnahme der Reflexionsleistung von 3% ausgeht, so muss man bei der Kostenkalkulation einer Gesamtanlage eine entsprechend größere Anzahl von Parabolrinnenkollektoren vorsehen, wenn die garantierte Gesamtleistung der Anlage auch nach 10 Jahren noch gewährleistet werden muss. Allerdings wird heute für Glasspiegel eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren verlangt, sodass man mindestens eine 10% größere Anzahl von Parabolrinnenkollektoren einkalkulieren muss.

Unter „Coastal“ oder „extreme Desert“ Bedingungen würden selbst die besten neuen Spiegelschichtsysteme viel früher versagen, so dass eine Wirtschaftlichkeit nicht erreicht würde.

Damit die neuen Spiegelmaterialien tatsächlich die Lebensdauer von Glasspiegeln erreichen, besteht weiterer Forschungsbedarf. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass sowohl die PVD-Spiegelschichtsysteme wie auch die Sol-Gel Schichtsysteme noch dichter werden. D. h. die Abscheidungstechnologie muss in beiden Fällen weiterentwickelt werden.

## **5. Entwicklung alternativer Tragstrukturen**

Die bisherige Dimensionierung der Kollektorstruktur basierte auf dem Ansatz einer Schale mit Vollquerschnitt, was insbesondere für die Herstellung (z. B. Schalungsaufwand) Vorteile bietet. Nachteilig ist, dass dadurch die wesentliche Einwirkung durch das Eigengewicht der Schale selbst auftritt, aber auch durch den erhöhten Materialaufwand die Kosten erhöht sind.

In Anbetracht einer seriellen Fertigung einer Vielzahl gleicher Module bieten sich aufgelöste Strukturen als Rippen- bzw. rippenverstärkte Schalenstrukturen – trotz erhöhtem Herstellungsaufwand der Schalformen – an, wodurch das Eigengewicht im Verhältnis zur Steifigkeit überproportional reduziert wird.

Erste Analysen an numerischen Modellen mithilfe von Formoptimierungsmethoden unter Ansatz von Eigen-, Wind- und Torsionslasten an Modellen mit einem Rippenraster von ca. 1 x 1 m zeigen dabei, dass rippenverstärkte Modelle sowohl eine bessere Genauigkeit aufweisen als auch ein geringeres Gewicht besitzen. Abbildung 5.1 zeigt die Ergebnisse einer Formoptimierung mit Ziel der Volumenminimierung unter Spannungs- und Verformungsrestriktionen, um sowohl materielle als auch optische Randbedingungen zu berücksichtigen. Dabei besitzt die formoptimierte Rippenstruktur eine mittlere Dicke von  $t=4,0$  cm und die rippenverstärkte Schalenstruktur eine mittlere Dicke von  $t=3,4$  cm, was in beiden Fällen eine Gewichtsreduzierung im Vergleich zum Demonstratormodul – mit einer mittleren Dicke von 4,5 cm – bedeutet. Die rechnerische Genauigkeit – beschrieben durch das quadratische Mittel der Oberflächensteigung  $SDx_{rms}$  – liegt ebenfalls weit unter dem angestrebten Grenzwert von 2,0 mrad. Eine rippenverstärkte Schale dominiert jedoch für beide Anforderungen eine reine Rippenstruktur.

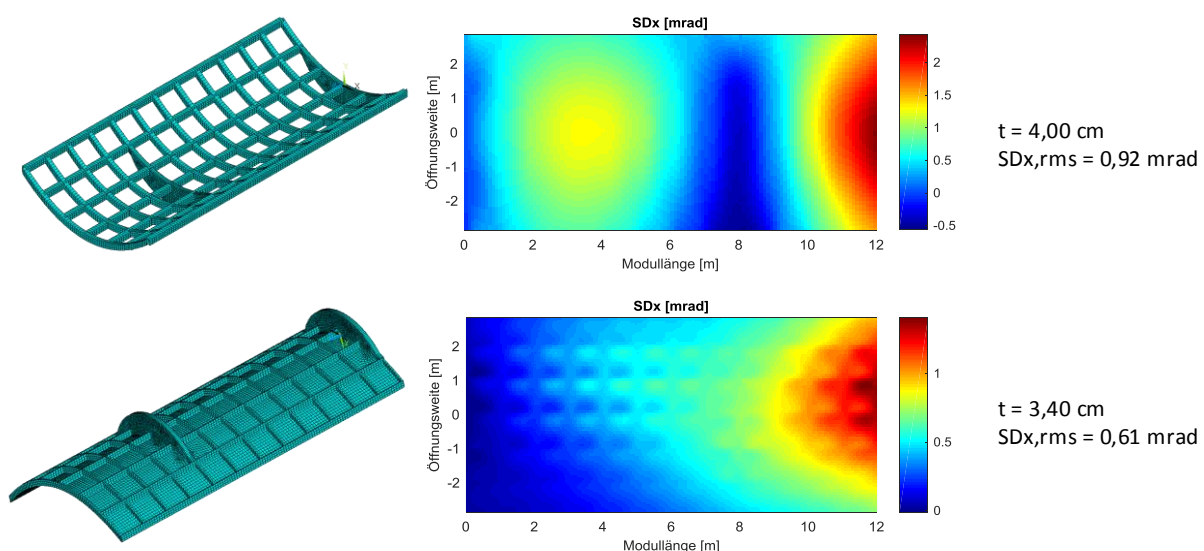


Abbildung 5.5.1: Gegenüberstellung von Rippen- (oben) und rippenverstärkter Schalenstruktur (unten) mit zugehörigem Steigungsfehler der Oberfläche  $SDx$

## 6. Numerische Umsetzung und Optimierung

Weiteres Optimierungspotenzial wird in der Anordnung der verstärkenden Rippen gesehen. Um ein dem Kraftfluss entsprechendes Design der Rippenanordnung zu finden, wird die Topologieoptimierung genutzt. Das Ziel einer Topologieoptimierung ist in der Regel die Minimierung der Systemnachgiebigkeit, was dem reziproken Wert der Systemsteifigkeit entspricht, also der Maximierung der Steifigkeit. Dabei wird nur ein prozentual abgeminderten Bereichs des Entwurfsraums - hier die Schalenstruktur - bei gegebener Belastung genutzt. In einem iterativen Prozess wird dann das Material, gesteuert über eine Pseudodichte im Wertebereich von 0-1 (1 = Material vorhanden, 0 = kein Material), im Entwurfsraum verteilt, bis die Zielfunktion konvergiert. Mithilfe geeigneter Lösungsalgorithmen können klare „1-0“-

Designs - hier mithilfe des SIMP-Verfahrens (solid isotropic microstructure with penalization), welches Zwischendichten „bestraft“ - generiert werden. Abbildung 5.6.1 zeigt die Ergebnisse für vereinfachte Lastansätze infolge Eigen-, Wind- und Torsionslast. Die roten Bereiche repräsentieren hier Bereiche mit Material, die blauen Bereiche ohne Material, sodass für jeden Lastfall mögliche Rippenmuster interpretiert werden können.

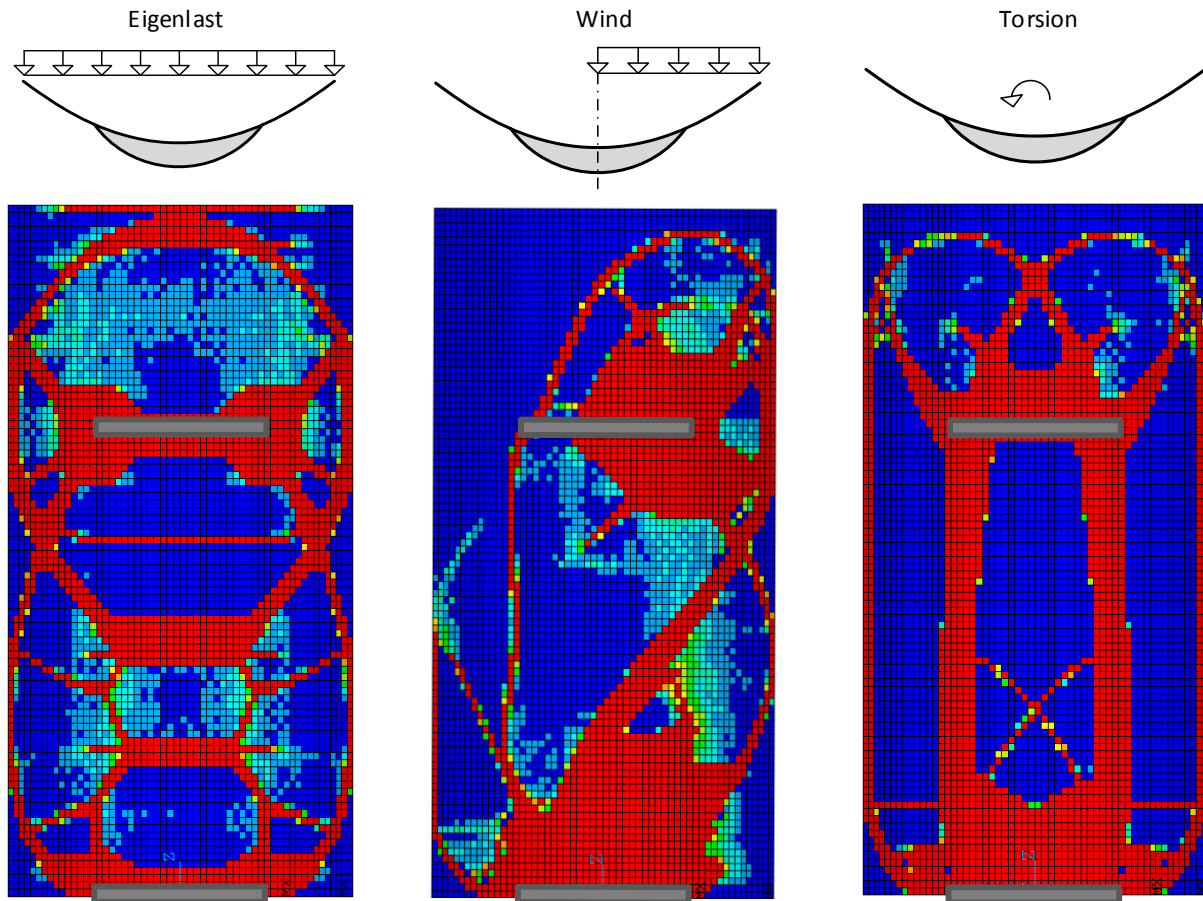


Abbildung 5.6.1: Ergebnisse der Topologieoptimierungen als Materialverteilung (rot = 1, blau = 0) für die Lastfälle Eigenlast, Wind und Torsion

Nachteilig ist jedoch, dass die so gefunden Designs lediglich für ihren speziellen Lastfall die maximale Steifigkeit (unter den angesetzten Restriktionen) besitzen und keine weiteren bzw. nur begrenzt andere Lasten aufnehmen können. Um ein Aussteifungskonzept zu entwickeln, welches mehrere Lastfälle sowie deren Einzellastfälle im Sinne einer robusten Tragstruktur aufnehmen kann, muss die Zielfunktion der Topologieoptimierung abgeändert werden. Dazu wird die Zielfunktion als gewichtete Summe der Nachgiebigkeiten je Lastfall minimiert. Das Ergebnis für eine gleichgewichtete Summennachgiebigkeit für die Lastfälle nach Abb. 5.6.1 und die daraus abgeleitete, kraftflussaffine Rippenanordnung ist in Abbildung 5.6.2 gegeben. Eine solche Anordnung ist somit robust gegen Einwirkungen infolge Eigen-, Wind- und Torsionslast.



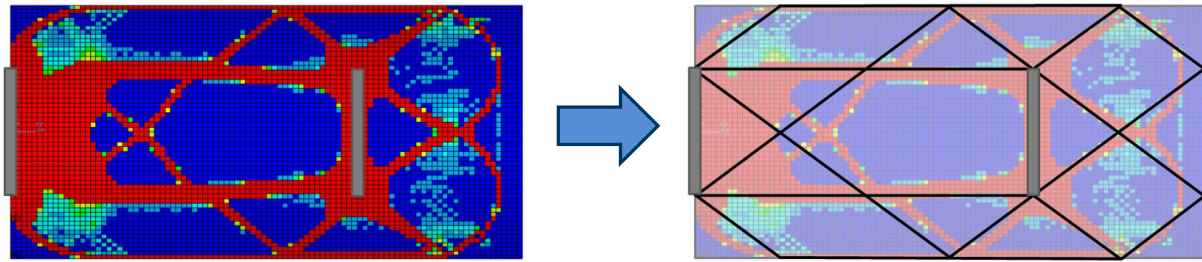


Abbildung 5.6.2: Dichterverteilung für die Summennachgiebigkeit aus den Lastfällen Eigen-, Wind- und Torsionslast (links) mit identifizierter Rippenanordnung (rechts)

Basierend auf den identifizierten Verstärkungsrippen wurde ein Finite-Elemente Modell aufgebaut, welches mithilfe von Formoptimierung dimensioniert wird. Abbildung 5.6.3 zeigt das Modell mit zugehörigem Steigungsfehler der Oberfläche infolge Eigen-, Wind- und Torsionslast für eine  $45^\circ$ -Auslenkung des Kollektors, wie bereits für die Rippenstrukturen nach Abbildung 5.5.1. Es zeigt sich, dass mit einer kraftflussaffinen Rippenanordnung sowohl die mittlere Dicke der Schalenstruktur auf  $t=2,9$  cm und der rechnerische Steigungsfehler auf  $SD_{x,rms}=0,44$  mrad reduziert werden kann, was eine weitere Verbesserung sowohl bzgl. der vollwandigen Struktur als auch den zuvor untersuchten verstärkten Rippenstruktur darstellt.

Somit können Eigenlasten und der Materialverbrauch (Materialkosten) der Schale auf ca. 60 % der vollwandigen Schale reduziert werden bei gleichzeitiger Genauigkeitssteigerung. Jedoch hat dies einen erhöhten Schalungsaufwand und somit –kosten zur Folge, welche sich jedoch bei einer Massenfertigung mit vielfach wiederverwendbaren Stahlschalungen amortisieren würde.

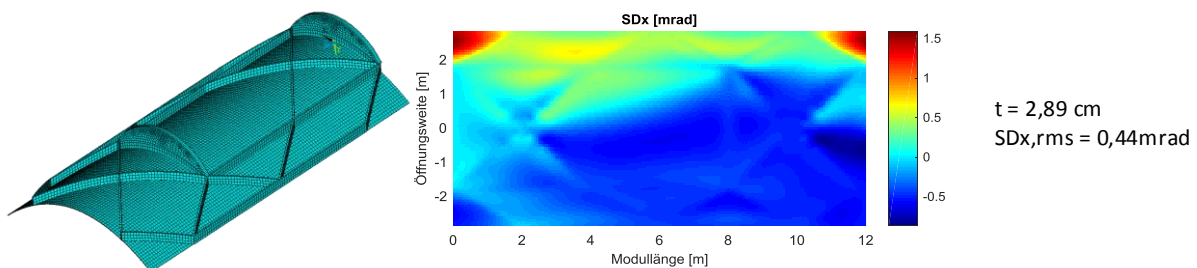


Abbildung 5.6.3: FE-Modell der kraftflussaffin verstärkten Schale (links) mit zugehörigem Steigungsfehler (rechts)

## 7. Visuelle und technische Aufbereitung der jeweiligen Designmodelle

Die entwickelten Rippen- und rippenverstärkte Strukturen wurden als 3D Modelle umgesetzt, vereinfachend als einzelnen Module (Abbildung 5.7.1). Diese dienten dann als Basis für weitere Analysen möglicher Kosteneinsparpotentiale der Schale.

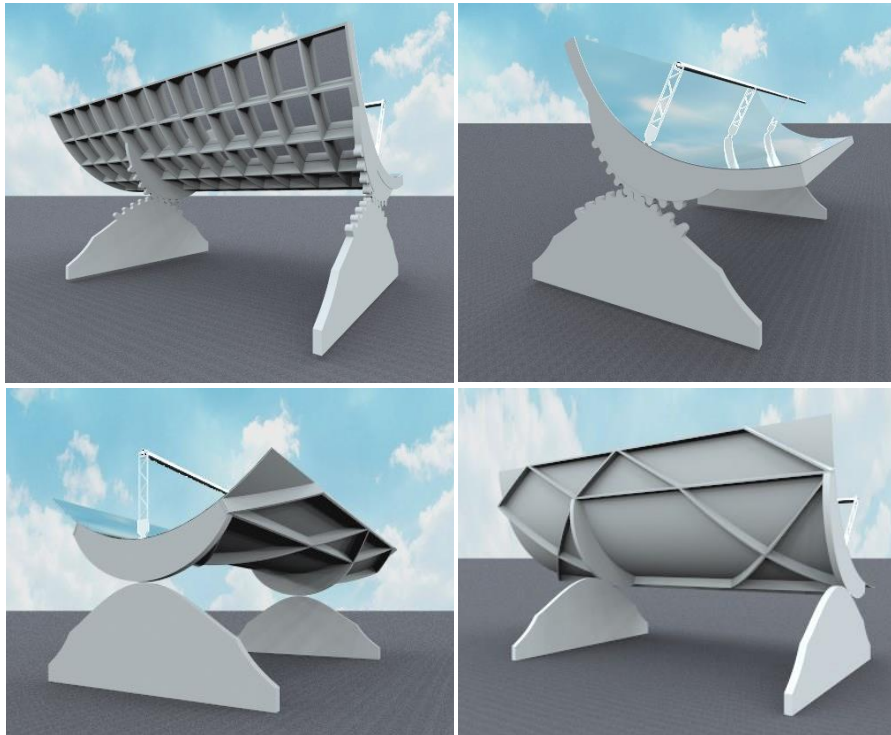


Abbildung 5.7.1: 3D-Modelle der rippenverstärkten Strukturen

Für die aufgelösten Rippenstrukturen zeigt sich, dass noch wesentliches Optimierungspotential sowohl hinsichtlich des Materialverbrauchs, als auch der Steifigkeit (Reduzierung der Steigungsabweichung  $SD_x$ ) erschlossen werden kann. In einer Gegenüberstellung der Strukturen mit den numerischen Ergebnissen des vollwandigen Demonstrators ersichtlich, können allein für die Schale Materialeinsparungen von bis zu 40 % erreicht werden, während die Genauigkeit um einen Faktor  $>4$  gesteigert werden kann (Abbildung 5.7.2). Bei einem symmetrischen System, wie es anfänglich geplant war, mit reduzierter Feldlänge sind aufgrund reduzierter Schnittgrößen weitere Volumenreduktionen von  $>50$  % denkbar.

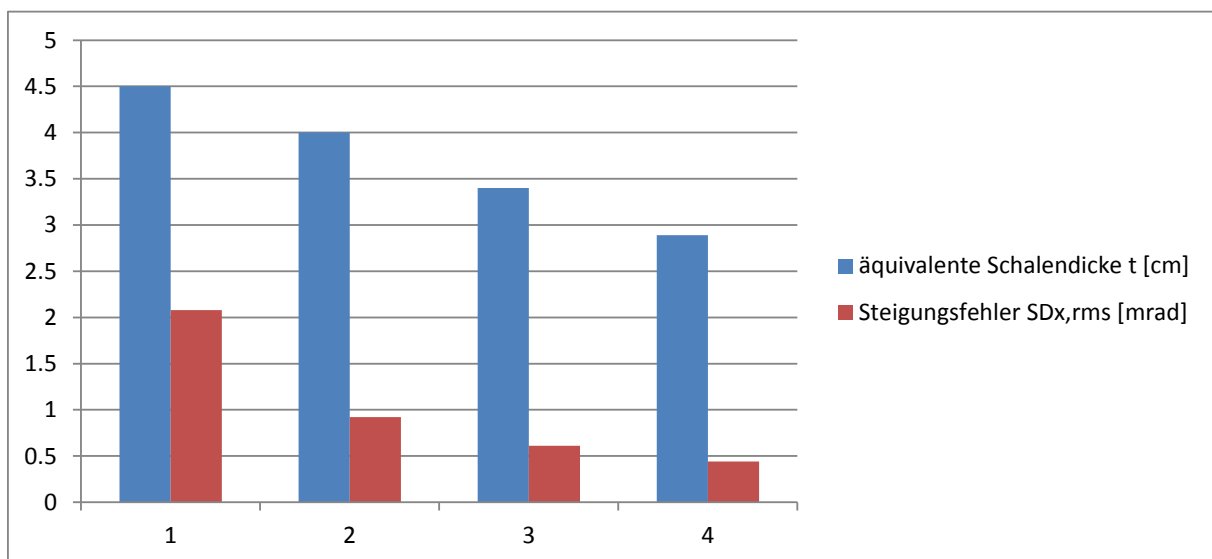


Abbildung 5.7.2: Vergleich von äquivalenter Schalendicke (representativ für das Volumen) und des Steigungsfehlers  $SD_x$  für die Modelle mit vollwandiger Schalung (1), Rippenmodell (2), rippenverstärkte Schale (3) und kraftflussaffin verstärkte Schale (4)

Weiteres Einsparpotential der Kosten für den kompletten Kollektor sind in Tabelle 5.7.1 zusammengefasst und zeigen auf, welche Maßnahmen ad-hoc zu Einsparpotential führen können. Dies wurde - soweit möglich - in Vergleichsrechnungen überprüft. Bei vertiefter Optimierung in Form aller Bauteile und des Prozesses sind weitere Reduktionen denkbar.

Tabelle 5.7.1: Mögliches Einsparpotential der Kollektorstruktur

Komponente		Beschreibung	Vorrauss. Kosten	
Schale	43,0 €/m <sup>2</sup>	<p>Die Materialkosten setzen sich der Demonstratoreinheit zu 2/3 aus Nanodur-Beton und 1/3 aus Bewehrung zusammen.</p> <p>Mögliche Einsparpotentiale bieten rippenverstärkte Schalenstrukturen, wie bereits gezeigt, die das Schalenvolumen (Betonvolumen) um bis zu 50 % reduzieren. Nachteilig sind die erhöhten Investitionskosten der Schalungen, welche aber einen vergleichsweise marginalen Anteil bilden. Eine Rückkehr zum symmetrischen System (Einfeldträger mit zwei Kragarmen) würde die Feldlängen reduzieren und so weitere Volumenreduktionen infolge geringerer Schnittgrößen auch für die Bewehrung (ca. 70 %) nach sich ziehen.</p> <p>Die im Prototyp verlegte Bewehrung wurde für eine statische Auslegung für eine Bauzulassung erstellt. Bei einer Realumsetzung sind noch wesentliche Einsparungen möglich bei kraftflussgerechter Bewehrungsführung oder dem Einsatz vom z. B. Stahlfaserbeton.</p>	50-60 %	23 €/m <sup>2</sup>
Unterbauten	32,5 €/m <sup>2</sup>	<p>Infolge Symmetrielagerung erfolgt bessere Verteilung der Lasten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- reduzierte Fundamentgrößen (-3 €/m<sup>2</sup>)</li> <li>- dünnere Abrollhügel und Sicheln (-3 €/m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>Alternative Nachführung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entfall des Antriebsbocks (-2,5 €/m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>Optimiertes Design der Unterkonstruktionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Massenreduktionen um bis zu 50 % und kraftflussgerechte Bewehrungsführung (-7 €/m<sup>2</sup>)</li> <li>- Vereinigung von Lauffläche und Zahnräder (-3 €/m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>➔ Zusätzliche Reduktion des Schalungsbaues</p>	40-50 %	14 €/m <sup>2</sup>
Personal-/Investitionskosten Betonbau	25,2 €/m <sup>2</sup>	<p>Die Personal- und Investitionskosten setzen sich aus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Personal 22,1 €/m<sup>2</sup></li> <li>- Investition 3,1 €/m<sup>2</sup></li> </ul> <p>zusammen. Aufwändigere Schalungen aufgrund komplizierterer Geometrie der Schale würden sich lediglich auf die Investitionskosten auswirken. Gleichzeitig wird infolge der Verschlankeung des Herstellprozesses bei den Unterbauten der Schalungsbau reduziert, sodass sich die Investitionskosten egalisieren und gleich Kosten zu erwarten sind. Personalkosten sind nicht betroffen.</p>	100 %	25,2 €/m <sup>2</sup>

Es zeigt sich, dass für die Materialkosten von Schale und Unterbauten Einsparpotentiale von ca. 50 % noch nicht ausgenutzt sind.

## **8. Untersuchung im Labor oder/und in situ, welche Materialien wie lange welchen Widerstand bieten**

Ein besonders aggressives und korrosives Umgebungsfeld wie etwa bei Salzbeaufschlagung in Wasserwechselzone liegt weder im Demonstrator Fall noch im großtechnischen Anwendungsfall in einer Wüstenregion vor.

Im Bereich der Anwendung der ConSol-Spiegel sind die Komponenten alle gut belüftet, oder zum Teil von Spiegel gegen Niederschlag geschützt.

Die Konstrukteure des Antriebs haben daher bei den Antriebskomponenten aus Wirtschaftlichkeitsgründen auf bewährte Standardbauteile zurückgegriffen, die im Maschinenbau bereits langjährig erfolgreich eingesetzt werden. Dies sind Elektromotor mit Getriebe, Kettenräder, Ketten, Spanner, Lager.

Es wurde bei der Auswahl und Ausbildung der Bauteile Wert gelegt auf eine ideale korrosionssichere Ausführung und konstruktive Durchbildung.

- Bei den Blechteilen handelt es sich um entweder sandgestrahlte und lackierte oder auch gestrahlte und verzinkte Bauteile.
- Die Schrauben sind verzinkt.
- Die Ketten sind mit O-Ringen gekapselte Ketten, die in den Gelenken damit gekapselt und selbstgeschmiert sind. Im Zweifelsfall ist ein schneller Austausch als Verschleißteil möglich.
- Die Zahnräder sind galvanisch geschützt, was bei einer trockenen oder gut belüfteten Umgebung als korrosionstechnisch unkritisch gesehen wird.
- Bei den Motoren/Getriebeeinheiten handelt es sich um außen lackierte und beschichtete Aluminiumgehäuse der Antriebseinheiten inklusive Getriebe.
- Die ausgesuchten Elemente wie das Getriebe oder der Motor sind gekapselt und innen Öl befüllt. Deren mechanische Innenleben sind somit mit einer korrosionshindernden langjährigen Dauerschmierung versehen. Es wurde so ausgewählt, dass Außenkontakt der bewegten Elemente nicht vorliegt.
- Das Gehäuse ist beschichtet und korrosionsgeschützt.
- Sollte es hier zu Undichtigkeiten und Leckagen kommen, ist ein Austausch von diesen einfachen kostengünstigen Standardkomponenten jederzeit Zeit kurzfristig und kostengünstig möglich.

Auf einen gesonderter Nachweis durch die Universität Stuttgart mit einer experimentellen Untersuchung der der Dauerhaftigkeit der verbauten Antriebskomponenten durch eine teure Langzeitexposition mit anschließenden Begutachtungen im Salz-Sprühnebel der Nordsee auf Helgoland konnte verzichtet werden, da keine neuartigen Werkstoffkombinationen oder wirklich neue Komponenten konstruiert werden mussten. Auch bei den neu konstruierten Teilen ist die Langlebigkeit durch konstruktiv bewährte Methoden des Maschinebaus bei der Auslegung und konstruktiven Durchbildung der Antriebseinheiten sichergestellt worden.

Durch die gesamten sorgfältig ergriffenen und abgewogenen Maßnahmen ist die Langlebigkeit der Anlage sicher gestellt.

## **9. Technische Dokumentation Antrieb: Bedienungsanleitung, Gefährdungsanalyse, ggf. Baumusterprüfung, Technische Dokumentation, Konformitätserklärung/CE Zeichen**

Im Rahmen der Entwicklung des Antriebs, der elektrischen Steuerung und der Montage sowie Inbetriebnahme wurde der Standardbetrieb mit seinen normalen Regelabläufen in einer Bedienungsanleitung ausführlich nieder gelegt. Dafür sind auf nahezu 20 Seiten alle Bedienelemente und alle Standardabläufe im Automatik- und Handbetrieb, Elektroinbetriebnahme sowie Beendigung des sicheren Betriebs ausführlich beschrieben. Darüber hinaus wurden die Gefährdungen im Betrieb und außerhalb, bei vorhersehbaren Abweichungen und Notfallsituationen ebenfalls beschrieben, einschließlich der drohenden Risiken und Gefährdungen. Abhilfemaßnahmen und Vermeidungsmaßnahmen wurden ausführlich dargestellt. Diese rund 20 Seiten umfassende Bedienungsanleitung wurde bei den ConSol-Partnern hinterlegt.

Im Rahmen der technischen Dokumentation wurde insoweit eine komplette Beschreibung des Antriebes und des Aufbaus in technischen Zeichnungen Beschreibungen und Festlegungen und in einem Ordner hinterlegt.

Für den Antrieb, der für sich nicht alleine lauffähig ist, gelten sinngemäß die Bestimmungen der Maschinenrichtlinie (Richtlinie des Rates und des Europäischen Parlaments 42/2006 für Maschinen) als quasi unvollständige Maschine. Erst durch die bauseitige Komplettierung durch die Betonanbauteile und der Sonnenkollektoren sowie der elektrischen Installationen und Softwaresachführung wird die gesamte Anlage lauffähig. Die Anlage ist aber wiederum nicht als Maschine, sondern als bauliche Anlage nach dem Baurecht zu sehen. Daher ist eine gesamte Konformitätserklärung für diese bauliche Anlage nicht formal erforderlich.

Insofern ist der Antrieb als solchen nur als unvollständige Maschine im Sinne des Anhangs II Abschn B der MaschRiLi 2006/42 zu sehen. Dafür wurden die notwendige technische Dokumentation, mit der Gefährdungsanalyse erstellt, eine Bedienungsanleitung darauf aufgebaut und entwickelt. Diese Dokumente sind für das Arbeitskonsortium auf der digitalen Plattform hinterlegt.

Aufgrund der erfüllten Anforderungen der MaschRiLi wurde die Konformitätserklärung für eine unvollständige Maschine nach der Maschinenrichtlinie 42/2006 erklärt. Dies ist im nachfolgenden Konformitätsdokument ablesbar.

Somit wurde umfassend eine technische Dokumentation, eine Bedienungsanleitung mit Gefährdungsanalysen und einer Konformitätserklärung entsprechend hinterlegt. Angesichts des Volumens der Bedienungsanleitung wurde diese hier nicht integriert und ebenso wie die technische Dokumentation auf einer extra Konsortium Plattform hinterlegt.

## 10. Simulationsrechnungen zur Abschätzung der zu erwartenden Jahreserträge und LEC

Anhand einer detaillierten Analyse der wirtschaftlichen und technischen Daten des ConSol-Kollektors (siehe AP3), wird in diesem Abschnitt ein Vergleich mit anderen im Markt verfügbaren Kollektordesigns durchgeführt. Insbesondere wird auf die Stromgestehungskosten geschaut, die ein wichtiger Indikator für die Wirtschaftlichkeit eines solchen Projektes sind. Als Vergleichssysteme werden die Kollektoren Skal-ET (*Solar Millennium*) und der SL4600 (*Solarlite*) herangezogen. Alle drei Kollektorsysteme werden mit der Software *Greenius* simuliert und anschließend gegenübergestellt und bewertet.

Das Simulationsprogramm *Greenius*, das seit 2001 am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) kontinuierlich weiterentwickelt wurde liefert sowohl Standortanalysen als auch Ertragsprognosen für Solar- und Windkraftanlagen. Es arbeitet mit stundenbasierten Werten der direkten Solareinstrahlung und betrachtet zusätzlich ökonomische Parameter wie Eigenkapitalsanteile und Zinssätze für Kredite.

Zu diesem Zweck werden Vergleichsbedingungen anhand eines bereits errichteten Projektes, unter Verwendung des *EuroTrough* (ET-150) Designs, definiert. Als Referenzprojekt wird hier das im Jahr 2008 in Betrieb genommene Andasol 1 – Kraftwerk genutzt. Dieses Projekt wurde bereits detailliert in *Greenius* simuliert und dient somit als Grundlage für diese Analyse.

Aus dieser Simulation ergeben sich folgende Rahmenbedingungen (siehe Tabelle 9.1). Diese Angaben werden für alle drei Kollektordesigns gleichgesetzt.

**Tabelle: 5.10.1 Rahmenbedingungen für Vergleichsanalyse**

Standortdetails	Andasol, Spain; 37.23 °N, 3.07 °E jährliche DNI von 2.111 kWh/m <sup>2</sup> /a
Kraftwerksdetails	50 MWe Dampfturbine mit Zwischenüberhitzung Bruttowirkungsgrad: 38,7 %
Thermischer Speicher	7,3 Volllaststunden 940 MWhth

Auf Grund der unterschiedlichen Geometrie der drei Systeme ergeben sich für die Bestimmung der aktiven Spiegelfläche leicht abweichende Werte (siehe Tabelle 9.2). Die Anzahl der zur Ertragsberechnung nötigen Kollektoren wurde für den SL4600 und des ConSol-Kollektor so gewählt, dass die Abweichung zu dem ET-150 möglichst gering ist. Die Unterschiede resultieren aus der geringen Aperturbreite des SL4600 von 4,6m im Gegensatz zu den 5,77m des ConSol- und des ET-150 Kollektors und der aktiven Segmentlänge.

**Tabelle 5.10.2: Bestimmung der Gesamtspiegelfläche**

	EuroTrough (ET-150)	Solarlite (SL4600)	ConSol
Aperturbreite (m)	5,77	4,6	5,77
Segmentlänge (m)	11,8	12	12,0
Anzahl Segmente pro Kollektor	12	10	12
Kollektorfläche (m <sup>2</sup> )	818	552	831
Anzahl Kollektoren per Loop	4	6	4
Gesamtanzahl Loops	156	156	156
Gesamtanzahl Kollektoren	624	936	624
Aktive Spiegelfläche (m <sup>2</sup> )	510.120	516.672	518.469

Für die Bestimmung des optischen Wirkungsgrads des ConSol-Kollektors wurden mit Ausnahme des Reflexionsgrads und des Intercept Faktor die gleichen Werte wie für den SL4600 angenommen. Der Reflexionsgrad des *Almeo*-Aluminiumspiegels wurde mit 92,3% in AP 1.3 bestimmt. Der Intercept Faktor von 85,6% wurde aus der Fotogrammetrie (AP 4, Abschnitt 18: *Bestimmung von optischem Wirkungsgrad und Anpassung eines vorhandenen Analyseprogrammes an die Kollektorgeometrie, Überprüfung der Nachführgenauigkeit*) abgeleitet. Aus diesen Werten ergibt sich ein optischer Wirkungsgrad von 67% für den ConSol-Kollektor (siehe Tabelle 9.3).

**Tabelle 5.10.3: Optischer Wirkungsgrad ConSol-Kollektor**

Reflexion - $\rho$	0,923
Transmission - $\tau$	0,96
Absorption - $\alpha$	0,95
Intercept factor - $\gamma$	0,856
Schatten & Blockierung	0,989
Bellows	0,96
Sauberkeit Spiegel & Receivers	0,98
<b>Optischer Spitzenwirkungsgrad</b>	<b>67,00%</b>

Der optische Wirkungsgrad der Kollektoren ET-150 und SL4600 sind Angaben der Hersteller. Folgende Tabelle 9.4 zeigt die Gegenüberstellung der optischen Wirkungsgrade.

**Tabelle 5.10.4: Optische Wirkungsgrade der Vergleichssysteme**

	EuroTrough (ET-150)	Solarlite (SL4600)	ConSol
Optischer Wirkungsgrad (%)	75,0%	75,1%	67,0%

Um die thermische Leistung der Solarfelder zu bestimmen, sind noch die Faktoren Reihenabstand der Kollektoren, maximale Windgeschwindigkeit für den Betrieb und die durchschnittliche Sauberkeit der Spiegel festzulegen (siehe Tabelle 9.5). Die Sauberkeit des ConSol-Kollektors wurde aufgrund der Sicherheitsstellung (nach oben gerichteter Parabolspiegel) von 97% auf 95% reduziert.



**Tabelle 5.10.5: Thermische Leistung der Solarfelder**

	EuroTrough (ET-150)	Solarlite (SL4600)	ConSol
Reihenabstand (m)	17,3	14	17,3
Abschaltwindgeschwindigkeit (m/s)	12	21	21
Durchschnittliche Sauberkeit (%)	97%	97%	95%
<b>Thermische Leistung bei 800 W/m<sup>2</sup> (kWth)</b>	<b>273.749</b>	<b>277.826</b>	<b>240.484</b>

Bei der Bestimmung der Investitionskosten wurden im AP3 zunächst die Kollektorkomponenten erfasst, die für einen Vergleich notwendig sind. Dabei wurden Kollektorkosten von 205,1€/m<sup>2</sup> für den ConSol Kollektor 186 €/m<sup>2</sup> für den Andasol Kollektor, sowie 155 €/m<sup>2</sup> für den SL4600 ermittelt. Dabei wurden Preisreduktionen z.B. für Receiver bei allen Kollektoren gleich berücksichtigt.

Für eine Berechnung der LEC ist jedoch eine vollständige Erfassung der Kollektorfeldkosten sinnvoll, die z.B. Landkosten, Erdarbeiten, Rohrleitungen, etc. einbezieht. Die in Tabelle 5.10.6 aufgeführten spez. Kosten beziehen diese Kosten mit ein.

Unter der Annahme, dass alle anderen Kosten für den Kraftwerksteil, Speicher, etc. gleich bleiben ergeben sich die in Tabelle 5.10.6 gezeigten gesamten Investitionskosten für die verschiedenen Kollektorsysteme.

**Tabelle 5.10.6: Investitionskosten**

	EuroTrough (ET-150)	Solarlite (SL4600)	ConSol
Spez. Quadratmeterpreis (€/m <sup>2</sup> )	242	211	261
Kosten Solarfeld (€)	123.449.154	108.552.787	134.957.512
Kosten Kraftwerksteil (€)	56.965.572	56.965.572	56.965.572
Kosten Speicher (€)	45.760.000	45.760.000	45.760.000
Andere Kosten (€)	24.190.000	22.850.000	25.226.500
Unvorhersehbare Kosten (€)	12.518.236	11.706.418	13.145.479
<b>Gesamte Investitionskosten (€)</b>	<b>262.882.962</b>	<b>245.834.777</b>	<b>276.055.063</b>

Die folgende Tabelle 5.10.7 zeigt die essentiellen Resultate aus der *Greenius* Simulation. Wie bereits aus den vorherigen Ergebnissen zu erkennen war, erreicht der ConSol-Kollektor nicht die Ertragszahlen der beiden Vergleichssysteme, was auf den schlechteren Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Unter Berücksichtigung der ebenfalls höheren Investitionskosten resultieren ca. 15 % höhere Stromgestehungskosten im Vergleich zum EuroTrough.

**Tabelle 5.10.7: Resultate *Greenius* Simulation**

	EuroTrough (ET-150)	Solarlite (SL4600)	ConSol
Mittlere jährliche Solarfeldeffizienz	43,8%	44,2%	37,1%
Jährlicher Wärmeertrag (MWhth/a)	471.507	482.226	405.474
Mittlere Systemeffizienz (%)	12,8%	12,9%	11,4%
Netto Stromproduktion (MWhe/a)	138.065	140.195	124.925
Stromgestehungskosten, LEC (€/kWhe)	0,1900	0,1765	0,2193
Jährlich eingesparte CO <sub>2</sub> -Emission (tCO <sub>2</sub> /a)	82.839	84.116	74.955

## **11. Bestimmung der Auswirkungen durch Formfehler oder Reflektivitätsverluste auf die Stromgestehungskosten über Jahresertragsberechnungen**

Formfehler der Kollektoroberfläche finden Eingang in den sogenannten Interceptfaktor und damit in den optischen Wirkungsgrad eines Kollektors. Die Reflektivitätsverluste werden üblicherweise nach ihren Ursachen eingeteilt in Verschmutzung und Alterung z.B. durch Ab-  
rasion. Diese Werte werden gesondert berücksichtigt im Programm greenius einmal durch einen konstanten Verschmutzungswert, der in den optischen Wirkungsgrad eingeht und durch einen jährlich steigenden Faktor für die Alterung je nach Spiegelqualität. In diesem Kapitel geht es bei der Reflektivität jedoch um den Unterschied zwischen Glas/Silber und Aluminium/Silber Spiegeln.

Die Formfehler beim ConSol Prototypen führen beim westlichen Modul, dessen Guss wie vorgesehen verlief, zu einem Intercept Faktor von 85,6% für die Zenitstellung bei einer Verlängerung der Fokallänge um 60mm.

Die Jahresertragsberechnungen in AP 2 Kap. 12 zeigen, dass ausgehend von Stromgestehungskosten von 13,56 €-ct/kWh (für den Kraftwerksstandort Standort Barstow/Daggett in Kalifornien) bei einem 97% Interceptfaktor jeder verlorene Prozentpunkt beim Interceptfaktor zu einer Erhöhung der Stromgestehungskosten um 0,11 €-ct führt.

Damit ergeben sich erhöhte Stromgestehungskosten von 14,81 €-ct /kWh wenn lediglich der verringerte Interceptfaktor berücksichtigt wird.

Der Reflexionsgrad des Aluminium/Silber Reflektors konnte im Laufe des ConSol Projekts erheblich gesteigert werden. Es wurde eine solar gewichtete, gerichtete Reflektivität von 0.923 erzielt. Im Vergleich dazu erzielen Glas/Silber Spiegel mit einer Dicke von 4mm, wie sie in solarthermischen Kraftwerken verwendet werden, einen Wert von 0.950.

Durch Formfehler und reduzierte Reflektivität ergeben sich damit LEC in Höhe von 15,08 €-ct /kWh und damit eine Steigerung um 9%.

## **12. Konzeptionierung alternativer Tragstrukturen (ca. 6x12m) für verklebte (Folie) und verbundorientierten Lösungen (Aluminium o.ä.) der Verspiegelung**

Die in Abschnitt 5 beschriebene formoptimierte Rippenstruktur bietet beste Voraussetzungen für den Einsatz von Tragstrukturen für die Verspiegelung. Für diese Art der Struktur kommen zwei Arten von Verbundlösungen in Frage.

### **I. Aluminiumverbundplatten**

Der Aufbau einer Aluminiumverbundplatte besteht im Allgemeinen aus einem Dreischicht-System. In der Mitte gibt es einen Polyethylen-Kern, der meist zwischen 2 – 6 mm variiert. Dieser Kern wird mit einer Aluminiumschuttschicht von ca. 0,3 mm eingefasst (nur die Deckflächen und nicht die Kanten). Durch diese Kombination las-

sen sich sehr gute Verbundkennwerte der Platten erreichen. Das Spiegelmateriale kann in einem weiteren Produktionsschritt auf die Platten aufgetragen werden.

Eigenschaften:

- Hohe Biegesteifigkeit und extrem gute Dimensionsstabilität, auch ideal für große Flächen. Die folgende Tabelle zeigt die gleiche Biegesteifigkeit von unterschiedlichen Materialien im Vergleich zu einer 3mm Aluminiumverbundplatte

**Tabelle: 5.12.1 Vergleich der Biegesteifigkeit von Aluminiumverbundplatten**

Dicke [mm]	Material	Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]
3	Aluminiumverbundplatten	3,8
2,4	Vollaluminium	6,5
11,1	PVC	5,6
1,7	Stahl	13,3
6,8	Acryl	8,2

- Hochwertig und langlebig auch für Außenanwendungen
- Temperaturbeständig von -50°C bis +80°C
- Hohe Korrosionsbeständigkeit
- Geringe Wärmeausdehnung
- Gute Verformbarkeit durch Biege- oder Abkantverfahren

## II. Faserverbund – Sandwichkonstruktionen

Der Aufbau der Sandwichkonstruktionen ist aufwendiger, als der von den Aluminiumverbundplatten. Das Innere dieses Verbundes besteht entweder aus einem festen EPS-Kern (Polystyrol), oder aus einem spritzfähigen Polyurethan. Dieser innere Kern wird mit einer Glasfasermatte umschlossen, die im Falle des EPS-Kerns mit einem Epoxidharz getränkt wird, oder bei der PU-Variante direkt von dem spritzfähigen PU durchdrungen wird. In beiden Fällen ist der Kern komplett umschlossen, was zu einer erhöhten Biegesteifigkeit führt. Neben der höheren Steifigkeit hat dieses Verfahren den Vorteil, dass das Spiegelmateriale direkt bei der Herstellung mit eingebaut werden kann. Weiterhin wird die Rückseite des Verbundes mit einer UV-stabilen Farbe geschützt. Die folgende Tabelle 5.13.2 zeigt die Eigenschaften einer Sandwichkonstruktion mit einem EPS-Kern.

**Tabelle 5.13.2 Eigenschaften Faserverbund-Sandwichkonstruktion**

Dicke des Verbundes	20mm
Dicke der Glasfasermatte	Max. 1mm
Dicke des EPS-Kerns	18 mm
Biegesteifigkeit	5x10 <sup>6</sup> Nmm
Spezifisches Gewicht	4,5 kg/m <sup>2</sup>

Für beide Arten der Spiegelunterkonstruktion gilt, dass somit eine Verspiegelung mit einem Klebstoff (flüssig oder Klebeband) auf der Baustelle entfällt. Die Platten können schon während der Produktion auf die Platten gebracht werden. Auch kann angenommen werden, dass die Biegesteifigkeit der vorgeschlagenen Lösungen eine weitere Reduzierung des Betoneinsatzes zur Folge hätte.